

LES BROUILLARDS D'EAU DANS LES TUNNELS ROUTIERS

État des connaissances et éléments
d'appréciation provisoires vis-à-vis de leur utilisation



Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Présent
pour
l'avenir



AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

*LES BROUILLARDS D'EAU
DANS LES TUNNELS ROUTIERS
État des connaissances et éléments
d'appréciation provisoires vis-à-vis de leur utilisation*

juin 2010

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	4
1. Contexte	6
1.1. Contexte particulier des incendies en tunnel routier	6
1.1.1. Nature et puissance des incendies	6
1.1.2. Dispositifs techniques et stratégies de sauvegarde des usagers	6
1.2. Contexte de l'utilisation des SFLI en tunnel	7
1.2.1. Position de l'association mondiale de la route	7
1.2.2. Exemples d'utilisation des SFLI dans le monde	8
1.2.3. Études et projets de recherche réalisés en Europe	8
1.2.4. Programme de recherche mené par le CETU	9
1.3. Attentes en matière de sécurité	10
2. Éléments constitutifs d'un système fixe de lutte contre l'incendie en tunnel	11
2.1. Choix de l'agent extincteur	11
2.2. Taille des gouttes	12
2.3. Cantonnement télécommandé de l'aspersion	12
2.4. Architecture type d'un système d'aspersion par brouillard d'eau en tunnel	13
2.5. Maintenance d'un système d'aspersion par brouillard d'eau en tunnel	14
3. Effets d'un système fixe de lutte contre l'incendie	15
3.1. Température et rayonnement	15
3.1.1. Réduction de la température des gaz	15
3.1.2. Atténuation du rayonnement	15
3.1.3. Propagation du feu	16
3.2. Puissance thermique du foyer	16
3.2.1. Cas d'un foyer liquide non caché	16
3.2.2. Cas d'un foyer solide non caché	16
3.2.3. Cas d'un foyer, liquide ou solide, caché	17
3.3. Toxicité des gaz	17
3.4. Conditions de visibilité	18
3.5. Synthèse des effets d'un SFLI	19
4. Éléments provisoires d'appréciation de l'utilisation de systèmes fixes d'aspersion par brouillard d'eau dans un tunnel routier	20
4.1. Objectifs recherchés et modalités d'activation	20
4.1.1. Assurer le niveau de sécurité prescrit	20
4.1.2. Augmenter la robustesse du système	20
4.1.3. Modalités d'activation	21
4.2. Effets d'une activation pendant la phase d'auto-évacuation des usagers	22
4.2.1. Activation dans une zone exempte de fumées	22
4.2.2. Activation avec présence de fumées stratifiées	22
4.2.3. Activation avec présence de fumées déstratifiées	24
4.2.4. Synthèse	25
4.3. Effets d'une activation pendant l'intervention des services de secours	26
4.3.1. Activation pour aider les usagers à évacuer	26
4.3.2. Activation après évacuation de tous les usagers	26
4.3.3. Synthèse	26
4.4. Protection de l'infrastructure	27
4.4.1. Désenfumage longitudinal en une seule phase	27
4.4.2. Désenfumage transversal ou longitudinal en deux phases	27
4.4.3. Niveau de protection apporté par un système d'aspersion par brouillard d'eau	27
Conclusion	28
Références	29

INTRODUCTION

Depuis la fin des années 1990 et les dramatiques incendies des tunnels du Mont Blanc, des Tauern et du Gothard, qui ont particulièrement frappé l'opinion publique, la sécurité des tunnels routiers est devenue une préoccupation majeure pour les autorités. Ces événements, ainsi que d'autres plus récents, ont confirmé le besoin croissant d'outils pour optimiser le niveau de sécurité de ces ouvrages en cas d'incendie, à la fois vis-à-vis de la sécurité des personnes et de la protection de l'infrastructure. Au delà des dispositions déjà prévues par la réglementation et progressivement mises en place, de nouveaux moyens sont fréquemment évoqués pour élever le niveau de sécurité des tunnels routiers.

Parmi ces nouveaux moyens, les systèmes fixes de lutte contre l'incendie (SFLI en abrégé dans la suite du document) et plus particulièrement ceux utilisant l'eau comme agent extincteur sont de plus en plus souvent cités à la fois par les services de secours et par les maîtres d'ouvrage, chacun avec des objectifs différents. Même si certains pays comme le Japon ou l'Australie installent de manière fréquente et prescriptive ce type de systèmes, les modalités de leur mise en œuvre restent délicates. De tels dispositifs ne peuvent présenter d'intérêt que s'ils s'intègrent dans une approche globale de la sécurité en tunnel. Les ouvrages souterrains présentent en effet des spécificités très différentes, notamment sur le plan de l'aéraulique, des autres lieux fermés d'utilisation courante et mieux connue de ces systèmes

(locaux compartimentés, salles des machines de navire, entrepôts...). La France, à l'instar des autres pays européens, a toujours adopté une position de réserve pour l'installation de ce dispositif en tunnel. L'action du système peut en effet induire, dans certaines conditions, des dangers supplémentaires pour les personnes exposées. Par ailleurs son efficacité réelle pour assurer la maîtrise d'incendies de véhicules en tunnel n'a, à ce jour, pas été démontrée avec suffisamment de précision et de certitude.

Le présent document s'appuie sur les travaux de recherche réalisés par le CETU, ainsi que ceux menés en Europe dans le cadre de divers projets de recherche sur la sécurité en tunnel. Il a pour objet de dresser un état des lieux sur les connaissances actuelles et de proposer des éléments d'appréciation sur l'utilisation de systèmes fixes de lutte contre l'incendie, particulièrement ceux utilisant la technologie « brouillard d'eau », dans les tunnels routiers.

Dans un premier temps, des éléments de contexte sur l'incendie en tunnel routier et sur l'utilisation des SFLI faite à l'heure actuelle dans le monde, seront développés. Ensuite, les différentes technologies de SFLI disponibles seront abordées. Dans une troisième partie, nous analyserons les différents effets des systèmes à brouillard d'eau sur un incendie en tunnel. Enfin, nous proposerons des éléments d'appréciation de l'utilisation des SFLI à base de brouillard d'eau en tunnel.

1.1 CONTEXTE PARTICULIER DES INCENDIES EN TUNNEL ROUTIER

1.1.1 Nature et puissance des incendies

La plupart des incendies en tunnel sont causés par une inflammation spontanée des véhicules par défaillance technique (échauffement anormal, court-circuit, ...). En revanche, la quasi-totalité des incendies ayant entraîné des décès est consécutive à un accident (à l'exception de ceux du Mont-Blanc en 1999 et du Fréjus en 2005). L'ordre d'apparition des dangers, lors d'un incendie en tunnel, est en général le suivant :

- le premier effet est l'arrivée des fumées, qui sont très opaques et gênent considérablement l'évacuation des usagers.
- dans un second temps, les usagers qui n'ont pas pu évacuer le tunnel à cause du manque de visibilité sont incommodés voire asphyxiés par les fumées dégagées par l'incendie, dont le niveau de toxicité augmente progressivement.
- enfin, la chaleur dégagée par l'incendie provoque de fortes élévations de température pouvant mettre en danger directement des personnes, mais aussi détruire ou endommager des véhicules ou des composants du tunnel parfois indispensables à la sécurité des usagers.

La puissance thermique dégagée par l'incendie d'un véhicule dans un tunnel routier peut varier de quelques mégawatts à 200 MW, voire plus, selon la nature du véhicule, voiture ou poids-lourd, et le type de chargement, avec présence de matière dangereuse ou non. La puissance thermique du foyer d'un incendie en tunnel peut donc largement dépasser celle que l'on peut rencontrer dans un lieu compartimenté comme un bâtiment où elle ne dépasse guère la dizaine de mégawatts. De plus, l'incendie d'un véhicule routier dans un tunnel fait intervenir des phénomènes physiques et chimiques liés à la fois à la combustion d'un matériau solide (comme un chargement de palettes de bois) et d'un matériau liquide (comme un hydrocarbure).

1.1.2 Dispositifs techniques et stratégies de sauvegarde des usagers

Lorsqu'un incendie se déclare dans un tunnel, les objectifs recherchés dans le cadre des stratégies de sauvegarde consistent à :

- permettre aux usagers de s'auto-évacuer,
- permettre la survie jusqu'à l'arrivée des services de secours des personnes qui ne se sont pas auto-évacuées,
- faciliter l'action des services de secours pour, d'une part, aider les usagers à évacuer, et d'autre part, lutter contre l'incendie,
- protéger l'infrastructure du tunnel.

Ainsi, les tunnels sont dotés d'un ensemble d'éléments visant à minimiser les conséquences d'un incendie. Les objectifs fondamentaux de ces dispositifs en cas d'incident ou d'accident sont :

- détecter les situations anormales et assurer la communication avec les usagers (moyens de surveillance et de détection, signalisation, postes d'appel d'urgence, ...),
- permettre la protection et l'évacuation des usagers, ainsi que l'accès des services de secours (issues de secours, abris, garages, éclairage de sécurité, ventilation, ...),
- se prémunir et lutter contre l'incendie (réaction et résistance au feu, moyens d'extinction, moyens de communication des services de secours, ventilation de désenfumage, ...).

Parmi ces dispositifs, le système de ventilation de désenfumage a un rôle essentiel puisqu'il est le seul équipement à agir directement sur les conditions ambiantes en tunnel. Par son action, il permet de retarder le dépassement des conditions ultimes de survie des usagers et d'intervention des services de secours dites conditions de tenabilité. Deux stratégies principales sont alors à distinguer :

- ou bien chercher à avoir un courant d'air longitudinal suffisamment fort pour pousser toutes les fumées vers l'un des côtés du tunnel, à condition que ce côté ait pu être au préalable évacué,
- ou bien chercher à limiter le courant d'air longitudinal pour conserver la stratification naturelle des fumées et les aspirer en plafond.

Dans ce second cas, les spécificités aérodynamiques des tunnels (différence de pression aux têtes, effet du déplacement des véhicules) imposent de disposer de nombreux anémomètres pour contrôler, quasiment en temps réel, le courant d'air longitudinal. Cette possibilité a une incidence très forte sur l'efficacité de la stratégie de sauvegarde.

Malgré ce rôle important, le niveau de sécurité d'un tunnel ne peut se résumer aux seules performances du système de ventilation

de désenfumage. La sécurité ne peut, en effet, s'apprécier que dans le cadre d'une approche systémique globale. Les dispositions de sécurité définies dans l'instruction technique annexée à

la circulaire n°2000-63, relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national, s'inscrivent dans cette démarche.

1.2 CONTEXTE DE L'UTILISATION DES SFLI EN TUNNEL

1.2.1 Position de l'association mondiale de la route

Depuis 1983, l'association mondiale de la route (AIPCR) traite de l'utilisation de systèmes fixes de lutte contre l'incendie dans les tunnels routiers. Les dernières recommandations publiées par l'AIPCR sur ce sujet dataient de 1999 [1] avant d'être remises à jour récemment [2].

La position « historique » de l'AIPCR est développée dans [1]. Elle indique que les systèmes fixes de lutte contre l'incendie permettent de refroidir le(s) véhicule(s) incendié(s) et donc de réduire la puissance thermique de l'incendie, ainsi que d'empêcher ou de limiter la propagation du feu aux autres véhicules et de stopper les incendies secondaires.

Néanmoins, malgré ces vertus, l'AIPCR recommandait de ne pas utiliser les systèmes fixes d'aspersion d'eau :

- pour sauver des vies, essentiellement lors des phases d'auto-évacuation et d'évacuation aidée des usagers, car l'usage d'un système fixe d'aspersion d'eau entraîne :
 - un risque de brûlure des usagers par la vapeur d'eau issue de l'évaporation des gouttes,
 - un refroidissement et une déstratification des fumées réduisant la visibilité dans le tunnel.
- pour protéger le tunnel après l'évacuation des usagers dans les tunnels courants à cause :
 - des coûts élevés de maintenance,
 - de la faible efficacité de ces systèmes pour éteindre l'incendie lorsque celui-ci est confiné à l'intérieur des véhicules.

Par ailleurs, le rapport [1] précise que l'utilisation d'un système fixe d'aspersion d'eau dans les tunnels peut également induire :

- un risque d'explosion lié à la projection de substances chimiques résultant de l'ébullition de l'eau à la surface du combustible si celle-ci est dépourvue de l'additif approprié,
- un risque d'explosion lié à la production de gaz inflammables malgré l'extinction de l'incendie.

Enfin, il souligne les difficultés posées par le déclenchement automatique des systèmes au moyen de thermofusibles, alors qu'il est nécessaire que le fonctionnement des systèmes fixes de lutte contre l'incendie puisse en permanence être contrôlé par des interventions humaines. Cette position de réserve à l'égard des systèmes fixes d'aspersion d'eau était fortement liée à la technologie utilisée à l'époque.

En effet, les difficultés liées à l'utilisation d'un système d'arro-

sage (pour reprendre les termes du rapport) mentionnées dans [1] se basent sur des systèmes dits « sprinklers » disponibles à la fin des années 90. Ces systèmes, proches de ceux que l'on peut trouver dans les bâtiments, sont activés automatiquement par thermo-fusibles et produisent des gouttes de diamètre important (de l'ordre du millimètre). Or, les évolutions et les innovations technologiques associées aux nombreuses recherches réalisées au cours de la dernière décennie sur les systèmes fixes de lutte contre l'incendie, et plus particulièrement sur les brouillards d'eau, ont conduit l'association mondiale de la route à reconsidérer sa position.

Dans son dernier rapport sur l'évaluation des systèmes fixes de lutte contre l'incendie dans les tunnels routiers [2], l'AIPCR indique que les principaux objectifs de tels systèmes sont de réduire :

- la vitesse de développement de l'incendie,
- la puissance thermique dégagée par l'incendie,
- la taille ultime de l'incendie,
- le risque de propagation du feu d'un véhicule à l'autre.

Néanmoins, même si chacun de ces objectifs peut aider à améliorer la sécurité des usagers, à faire en sorte que la section incendiée soit accessible aux services de secours et à maintenir l'intégrité de la structure, l'installation d'un système fixe de lutte contre l'incendie n'est que l'une des nombreuses options permettant d'accroître la sécurité dans un tunnel routier, d'autres étant la ventilation, les voies d'évacuation, les issues de secours, les systèmes de détection... Il convient donc, pour juger de l'efficacité d'un tel système, de ne pas se limiter à ses seules performances intrinsèques, mais bien de considérer son intégration d'un point de vue systémique et d'analyser l'efficacité de l'ensemble du système de sécurité dont le système fixe de lutte contre l'incendie peut être un composant.

Dans ce but, l'AIPCR souligne qu'avant d'installer un système fixe de lutte contre l'incendie, il est indispensable :

- de s'assurer de sa fiabilité, et donc de bien évaluer ses coûts de maintenance et de fonctionnement,
- de bien analyser et comprendre son interdépendance avec les autres éléments de sécurité,
- d'accorder une attention particulière aux décisions opérationnelles relatives à son activation, c'est-à-dire quand, où et par qui ce système doit être activé,
- de disposer d'un système de détection et de localisation de l'incendie qui soit efficace afin de déclencher le SFLI de façon appropriée.

1.2.2 Exemples d'utilisation des SFLI dans le monde

L'utilisation de systèmes fixes de lutte contre l'incendie dans des lieux compartimentés comme les bâtiments ou les salles des machines de navires est aujourd'hui très répandue à travers le monde. En revanche, leur utilisation dans les tunnels routiers est beaucoup plus marginale puisque seuls le Japon, et dans une moindre mesure l'Australie, équipent certains de leurs tunnels routiers de tels systèmes, de façon prescriptive. Dans le reste du monde, où l'installation reste décidée au cas par cas, on dénombre aujourd'hui moins d'une vingtaine de tunnels routiers disposant d'un système fixe de lutte contre l'incendie ou pour lesquels un projet d'installation est en cours (voir figure 1).

Cette utilisation prudente des systèmes fixes de lutte contre l'incendie dans les tunnels routiers à travers le monde s'explique notamment par les spécificités d'un incendie dans un tunnel routier dues, d'une part, aux caractéristiques aérodynamiques des ouvrages souterrains, et d'autre part, à la nature et à la puissance des incendies susceptibles de se développer en tunnel.

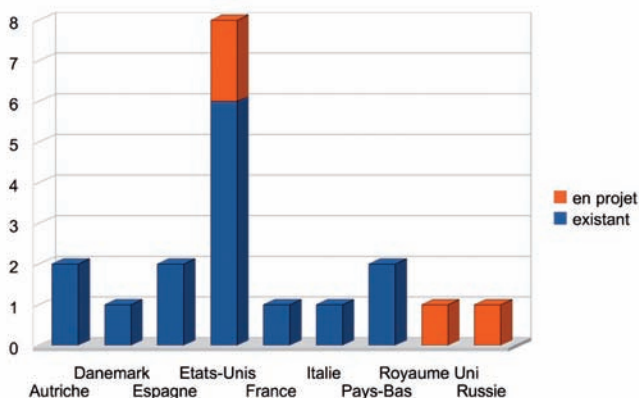


Figure 1 : Nombre de tunnels routiers équipés d'un système fixe de lutte contre l'incendie dans le monde (sauf Japon et Australie)

1.2.3 Études et projets de recherche réalisés en Europe

Projet Européen UPTUN

Suite aux incendies catastrophiques des tunnels routiers du Mont Blanc et des Tauern en 1999, et à celui du tunnel du Gothard en 2001, de nombreux projets de recherche visant à améliorer la sécurité dans les tunnels ont été lancés à

l'échelle européenne.

Parmi ces projets européens, le projet UPTUN (cost-effective, sustainable and innovative UPgrading methods for fire safety in existing TUNNels) a étudié notamment la possibilité d'utiliser des systèmes d'aspersion d'eau dans les tunnels. Ce projet, d'environ 13 millions d'euros, s'est déroulé de 2002 à 2006 et regroupait 41 partenaires provenant de 14 pays. Deux grandes campagnes d'essais ont été réalisées dans le cadre de ce projet.

À ces campagnes s'ajoutent les essais réalisés dans le tunnel désaffecté de Runehamar en Norvège et le tunnel autoroutier de Virgolo en Italie. Ces essais ont été menés avec des systèmes fixes de lutte contre l'incendie à base de brouillard d'eau haute pression.

• 1^{ère} campagne : procédés actuels de lutte contre l'incendie en tunnel [3]

Cette campagne a été réalisée dans la galerie d'essais de Deutsche Montan Technology (DMT) à Dortmund en Allemagne, laquelle présente une section de 9,7 m² et une longueur de 150 m. Son but était d'évaluer les performances de trois types de systèmes fixes d'aspersion d'eau existants pour une application en tunnel :

- un système à rideaux d'eau,
- un système d'aspersion de gouttes d'eau présentant un diamètre de l'ordre du millimètre, dit « sprinkler »,
- un système d'aspersion par « brouillard d'eau » à basse pression.

Les essais ont été réalisés avec, d'une part, un foyer constitué de bacs d'heptane pouvant fournir une puissance thermique maximale de 20 MW, et d'autre part, une vitesse du courant d'air longitudinal de 1 ou 3 m.s⁻¹.

• 2^{ème} campagne : technologies innovantes de lutte contre l'incendie en tunnel [4]

Cette campagne a été réalisée dans la galerie d'essais de la compagnie d'assurance IF située en périphérie d'Oslo, qui présente une section de 40 m² et une longueur de 100 m. Son but était d'évaluer les performances de deux types de systèmes fixes d'aspersion d'eau innovants pour une application en tunnel :

- un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau à basse pression (< 12,5 bar),
- un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau à haute pression (> 35 bar).

Les essais ont été réalisés avec, d'une part, un foyer constitué soit de bacs d'heptane, soit de palettes de bois, pouvant fournir

respectivement une puissance thermique maximale de 20 et 15 MW, et d'autre part, une vitesse du courant d'air longitudinal de 1 ou 2,5 m.s⁻¹.

Projet SOLIT

Le projet Safety Of Life In Tunnel, dit SOLIT, est un projet de recherche financé par le ministère fédéral de l'économie et de la technologie allemand qui avait pour objectifs de tester et d'évaluer l'efficacité d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau à haute pression pour améliorer la sécurité dans les tunnels.

Dans le cadre de ce projet, une campagne d'essais a été réalisée dans la galerie d'essai de San Pedro de Anes (Espagne). Cette galerie a été construite par le gouvernement régional des Asturies et est exploitée par la société Tunnel Safety Testing SA. Elle présente comme caractéristiques géométriques une largeur de 9,80 m, une hauteur de 5,20 m et une longueur de 600 m, et permet de simuler un système de ventilation longitudinal ou semi-transversal, c'est-à-dire avec seulement une extraction de l'air vicié. Les essais ont été réalisés avec un foyer constitué, soit de bacs d'heptane similaires à ceux utilisés dans le cadre du projet UPTUN, soit de palettes de bois recouvertes ou non d'une bâche.

Essais de Hagerbach - tunnel de l'A86 ouest

Afin d'étudier l'efficacité du système fixe d'aspersion par brouillard d'eau en vue d'une installation dans le tunnel de l'A86 ouest autorisé seulement aux véhicules légers, la société Cofiroute a réalisé une campagne d'essais avec et sans aspersion d'eau dans la galerie d'essais d'Hagerbach (Suisse) [5].

Deux campagnes d'essais ont été réalisées afin de tester deux systèmes fixes d'aspersion par brouillard d'eau, l'un à moyenne pression (comprise entre 12,5 bar et 35 bar) et l'autre à haute pression (> 35 bar). Ces essais visaient essentiellement à mesurer l'efficacité de tels systèmes pour limiter la transmission du feu entre véhicules légers rapprochés les uns des autres dans une géométrie particulière à gabarit réduit. Ils n'ont pas abordé la problématique des incendies de poids-lourds dans un tunnel à gabarit normal.

1.2.4 Programme de recherche mené par le CETU

Pour qualifier correctement les SFLI en vue d'un usage dans les tunnels routiers, des connaissances supplémentaires s'avèrent indispensables. C'est la raison pour laquelle le CETU a engagé, dès 2002, une action de recherche spécifique, qui dans une première étape a conduit à l'identifica-

tion de deux objectifs en matière de sécurité pour de tels systèmes [6], à savoir :

- améliorer les conditions d'auto-évacuation pour les usagers,
- prolonger les conditions de tenabilité pour les usagers non évacués et les services de secours en situation d'intervention.

La deuxième étape de cette réflexion a consisté en une approche pragmatique visant à cibler la réflexion sur un cas de tunnel à circulation bidirectionnelle. Cette approche (voir notamment [7], [8] et [9]) a été menée, pour le compte du CETU, par BG Ingénieurs Conseils, en deux volets, un premier concernant l'estimation de la faisabilité et des coûts d'installation et de maintenance de systèmes fixes de lutte contre l'incendie, le second traitant de l'efficacité de tels systèmes sur des incendies de référence avec une fin de comparaison des niveaux de sécurité proposés par ces systèmes. Les conclusions de cette étude sont de nature à justifier la poursuite de recherches plus poussées dans le domaine.

Afin d'estimer les effets mal connus d'un SFLI sur un incendie en tunnel, plusieurs moyens sont envisageables. L'approche expérimentale semble la plus évidente et c'est dans cette voie que le CETU s'est engagé avec la volonté de réaliser un programme d'essais en deux phases : la première en utilisant un tunnel à échelle réduite (facteur d'échelle de l'ordre 1/3) sur le site du CSTB, la seconde étant centrée sur des essais en vraie grandeur.

Pour l'heure, seule la première étape a été réalisée au moyen d'une campagne ambitieuse d'une trentaine d'essais en collaboration avec le CSTB [10]. Ces essais, réalisés sur des foyers ouverts ou semi-cachés, constitués par des bacs d'heptane, des bûchers ou des palettes de bois, avaient pour but, d'une part, de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu, et d'autre part, d'évaluer l'efficacité d'un tel système. Ils visaient également à qualifier les méthodes de mesure de grandeurs telles que la température avec des sondes protégées ou non de l'aspersion, et surtout de l'opacité mesurée selon plusieurs techniques (laser, transmission lumière blanche, diffusion), la question de la visibilité en présence d'aspersion d'eau restant encore une des principales préoccupations. En parallèle, une approche théorique basée sur une modélisation tridimensionnelle des essais à échelle réduite a été développée au cours d'une thèse [11].

1.3 ATTENTES EN MATIÈRE DE SÉCURITÉ

Compte tenu des spécificités des incendies en tunnel routier en termes d'aérodynamique, de puissance thermique, de confinement du foyer et de nature du combustible, il est nécessaire d'être prudent sur les gains de sécurité que peut apporter l'utilisation d'un système fixe de lutte contre l'incendie.

L'évaluation de l'efficacité d'un tel système dans un tunnel mérite une réflexion approfondie pour laquelle il est nécessaire de mieux connaître et comprendre les phénomènes mis en jeu, ainsi que leurs impacts sur les conditions ambiantes et sur les stratégies de sauvegarde.

En effet, chacun des objectifs recherchés dans le cadre des stratégies de sauvegarde dépend des conditions ambiantes en tunnel, c'est-à-dire des conditions de visibilité, de la toxicité des gaz, ainsi que de la température et des effets du rayonnement. Toutefois, chacun de ces aspects n'a pas la même importance selon l'objectif recherché. Contrairement aux usagers, les ser-

vices de secours savent se déplacer en l'absence de visibilité et sont équipés d'appareils respiratoires isolants. Leur action sera, par conséquent, moins sensible aux conditions de visibilité et à la toxicité des gaz. La protection de l'infrastructure du tunnel n'est, quant à elle, pas du tout sensible aux conditions de visibilité et à la toxicité des gaz puisqu'elle dépend exclusivement de la température et des effets du rayonnement.

Le tableau ci-après résume l'importance relative des conditions ambiantes en tunnel en fonction des objectifs recherchés dans le cadre des stratégies de sauvegarde.

Par son action, le système fixe de lutte contre l'incendie peut améliorer ou détériorer certaines des conditions ambiantes et donc agir sur la capacité d'auto-évacuation des usagers, sur l'action des secours ou sur la protection de l'infrastructure du tunnel.

	visibilité	toxicité	température ¹
permettre l'auto-évacuation	+++	++	+
prolonger les conditions de tenabilité	+	+++	++
faciliter l'action des services de secours	++	+	+++
protéger l'infrastructure du tunnel	0	0	+++

+++ : très important

++ : important

+ : moins important

0 : sans incidence

Tableau 1 : Importance relative des conditions ambiantes en tunnel en fonction des objectifs recherchés dans le cadre des stratégies de sauvegarde

1 : et effet du rayonnement.

2

ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS D'UN SYSTÈME FIXE DE LUTTE CONTRE LES INCENDIES EN TUNNEL

Pour évaluer quel est le système fixe de lutte contre l'incendie le plus adapté aux tunnels routiers, il est nécessaire de prendre en compte, d'une part, la spécificité des incendies dans ces

ouvrages, et d'autre part, l'intégration de cet équipement dans le cadre d'une approche systémique de la sécurité.

2.1 CHOIX DE L'AGENT EXTINCTEUR

La norme NF EN 2 distingue quatre classes de feu selon la nature du combustible :

- les feux de classe A, c'est-à-dire les feux de matériaux solides dont la combustion se fait généralement avec formation de braises,
- les feux de classe B, c'est-à-dire les feux de liquides ou de solides liquéfiables,
- les feux de classe C, c'est-à-dire les feux de gaz,
- les feux de classe D, c'est-à-dire les feux de métaux.

Pour attaquer efficacement un incendie, il est indispensable de

disposer de l'agent extincteur le plus approprié à la classe du feu. Il existe en effet plusieurs types d'agents extincteurs tels que le gaz inerte (CO₂, Ar, N₂ ou un mélange des trois), le gaz inhibiteur (aussi appelé halon, interdit depuis 2004), la poudre, l'eau pure et l'eau additionnée d'un tensio-actif. Les principes de fonctionnement de ces différents agents extincteurs sont largement décrits dans [12].

Dans les cas usuels d'utilisation des systèmes fixes de lutte contre l'incendie, c'est-à-dire lorsque le foyer n'est ni confiné, ni ventilé, le tableau ci-dessous² récapitule l'efficacité des agents extincteurs en fonction de la classe du feu.

	classe A	classe B	classe C	classe D
gaz inerte	M	B	B	*
gaz inhibiteur	M	B	B	
poudre BC	M	B	B	
poudre ABC	B	B	B	
eau pure en jet pulvérisé	B	L	M	
eau avec tensio-actif en jet pulvérisé	B	B	M	
mousse	L	B	M	

B : bonne efficacité

L : efficacité limitée

M : mauvaise efficacité

* n'utiliser sur des feux de classe D que des extincteurs à liquide ou à poudre spéciaux.

Tableau 2 : Efficacité des agents extincteurs en fonction de la classe de feu

Dans le cas des tunnels, les feux les plus couramment rencontrés sont des feux de classe A ou de classe B. Compte tenu des spécificités des incendies en tunnel, notamment en termes d'aérodynamique et de confinement du foyer, l'agent extincteur le plus adapté pour être utilisé dans un système fixe de lutte contre l'incendie semble être l'eau pure de par sa polyvalence, mais aussi car elle est l'agent extincteur le plus utilisé et le mieux connu. En effet, d'une part, les gaz inertes, les gaz inhibiteurs et les poudres BC ne sont pas efficaces sur des feux de classe A non confinés et non ventilés, et donc, *a fortiori*, sur des

feux de classe A confinés et ventilés. D'autre part, les poudres ABC, les mousses, et dans une moindre mesure l'eau additionnée d'un tensio-actif, ont besoin pour être efficaces que le foyer ne soit pas caché afin de pouvoir atteindre la surface du combustible. Ce n'est pas le cas de la majorité des incendies en tunnel.

Ainsi, dans la suite du présent document, nous ne nous intéresserons qu'à des systèmes fixes de lutte contre l'incendie ayant recours à l'eau pure comme agent extincteur.

² : extrait de l'aide mémoire juridique TJ 20 relatif à la prévention des incendies sur les lieux de travail de l'Institut National de Recherche et de Sécurité datée du 1^{er} octobre 2004.

2.2 TAILLE DES GOUTTES

La technologie actuelle permet d'obtenir différentes tailles de gouttes d'eau en jouant sur la pression de l'eau et sur la technologie des buses d'aspersion. Actuellement, deux types de systèmes fixes d'aspersion d'eau sont à distinguer selon la distribution de la taille des gouttes : les systèmes d'aspersion par brouillard d'eau et les systèmes d'aspersion de grosses gouttes, dits sprinklers.

Conformément à la norme NBN CEN/TS 14972 publiée le 12 mai 2008 et à la norme NFPA 750³ de la National Fire Protection Association (USA), on appelle brouillard d'eau un spray de diamètre caractéristique $D_{v0,9}$ inférieur à 1 mm, c'est à dire pour lequel 90 % du volume d'eau injecté est formé par des gouttes de diamètre inférieur à 1 mm. Pour un diamètre caractéristique $D_{v0,9}$ supérieur à 1 mm, on parle de sprinklers ou de systèmes à grosses gouttes. La norme NFPA 750 distingue 3 classes de brouillards d'eau selon le diamètre caractéristique $D_{v0,9}$ (cf. tab. 3).

Classe I	Classe II	Classe III
$D_{v0,9} \leq 200 \mu\text{m}$	$200 \mu\text{m} \leq D_{v0,9} \leq 400 \mu\text{m}$	$400 \mu\text{m} \leq D_{v0,9} \leq 1000 \mu\text{m}$

Tableau 3 : Classe des brouillards d'eau selon la norme NFPA 750

Les brouillards d'eau de classe III, tout comme les sprinklers à grosses gouttes, sont plutôt adaptés aux feux de classe A. En effet, la taille des gouttes leur permet d'atteindre la surface du combustible solide, sous réserve que celui-ci ne soit pas caché, et donc de refroidir le foyer solide.

Par contre, de tels brouillards d'eau sont moins efficaces que les brouillards d'eau de classe I pour refroidir une phase gazeuse comme l'air et les fumées. En effet, plus les gouttes pulvérisées sont grosses, moins la vaporisation de ces gouttes permet un refroidissement des gaz et une atténuation du rayonnement

puisque, à quantité d'eau égale, plus les gouttes sont grosses, moins la surface d'échange thermique est importante et plus faible est la quantité d'eau vaporisée.

Dans le cas d'un incendie en tunnel, le foyer est le plus souvent caché, ce qui empêche une aspersion directe de la surface du combustible. L'efficacité d'un système fixe d'aspersion d'eau est donc meilleure si l'on a recours à un brouillard d'eau de classe I plutôt qu'à de grosses gouttes (classe III ou sprinkler). Par la suite, nous ne nous intéresserons qu'à des brouillards d'eau de classe I.

2.3 CANTONNEMENT TÉLÉCOMMANDÉ DE L'ASPERSION

Lors d'un incendie dans un tunnel routier, l'opérateur et les services de secours doivent conserver tout au long de l'incendie un contrôle manuel total des équipements de sécurité du tunnel afin de définir la meilleure stratégie de mise en sécurité des usagers et d'intervention. Cette nécessité impose que le système d'aspersion soit piloté à l'aide, non pas de thermo-fusibles qui rendraient impossible son contrôle manuel, mais de valves télécommandées. L'aspersion doit donc être cantonnée. Un système d'aspersion constitué de cantons télécommandés est communément appelé système « déluge ».

De façon à optimiser l'efficacité du système, l'aspersion doit être limitée aux zones où les températures sont suffisantes pour permettre la vaporisation des gouttelettes en tenant

compte des incertitudes de localisation du foyer. En effet, en-dehors de ces zones, l'aspersion devient inefficace puisque les gouttelettes ne sont pas vaporisées. Pour ces raisons, les constructeurs préconisent de retenir des longueurs totales d'aspersion de l'ordre de 100 à 150 m comprenant 2 ou 3 cantons d'aspersion indépendants télécommandés. A titre de comparaison, la zone d'extraction des fumées en ventilation transversale représente entre 400 et 600 m, l'interdistance entre deux issues de secours est réglementairement de 200 à 400 m, et pour la ventilation longitudinale, l'interdistance entre deux batteries d'accélérateurs est de l'ordre de 100 m. Ainsi, la zone d'aspersion activée lors d'un incendie est relativement limitée.

3 : NFPA 750 - standard of water mist fire protection systems, édition 2006.

ARCHITECTURE TYPE D'UN SYSTÈME D'ASPERSION PAR BROUILLARD D'EAU EN TUNNEL

La quantité importante d'eau (environ 500 m³ pour 2h de fonctionnement) nécessaire au fonctionnement d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau couplée à la pression nécessaire pour obtenir ce brouillard exclut l'utilisation du réseau incendie pour l'alimenter. Il est donc nécessaire de créer un réseau spécifique, qui doit être protégé des effets du gel, constitué de matériaux inoxydables et équipé de filtres. Il doit en outre intégrer un traitement de l'eau contre les bactéries permettant de garantir la santé des usagers.

Les buses sont généralement implantées en plafond. Une telle implantation permet de réduire la température des gaz en favorisant la vaporisation des gouttelettes du brouillard d'eau, mais limite considérablement l'action de l'aspersion sur le foyer.

L'implantation de buses à la base des piédroits pourrait être envisagée afin de faciliter l'action du brouillard d'eau sur le foyer. En effet, compte tenu du gradient thermique, la vaporisation des gouttelettes du brouillard d'eau est moindre dans le cas de buses implantées à la base des piédroits que dans le cas de buses implantées en plafond. Ces gouttelettes peuvent donc plus facilement atteindre la surface du combustible. L'aspersion d'eau pure à l'aide de buses implantées à la base des piédroits

serait donc susceptible de réduire la puissance thermique du foyer par une action sur la surface du combustible sous réserve que celle-ci soit suffisamment accessible aux gouttelettes du brouillard d'eau.

Toutefois, nous ne disposons pas d'une étude précise comparant l'efficacité de ces deux types d'implantation des buses et évaluant leur complémentarité éventuelle. Compte tenu du fait que la majorité des foyers d'incendie en tunnel sont cachés, il est sans doute préférable à l'heure actuelle de suivre les préconisations des fabricants de système d'aspersion de brouillard d'eau qui sont favorables à une implantation des buses uniquement en plafond.

Par ailleurs, de manière à avoir une aspersion efficace quelle que soit la position transversale de l'incendie, il est nécessaire de prévoir des buses réparties sur plusieurs axes longitudinaux dont le nombre dépend de la largeur du tunnel (cf. fig. 2).

Les coûts d'installation d'un tel système d'aspersion par brouillard d'eau sont estimés à environ 2 000 k€ par kilomètre de tube équipé [8].

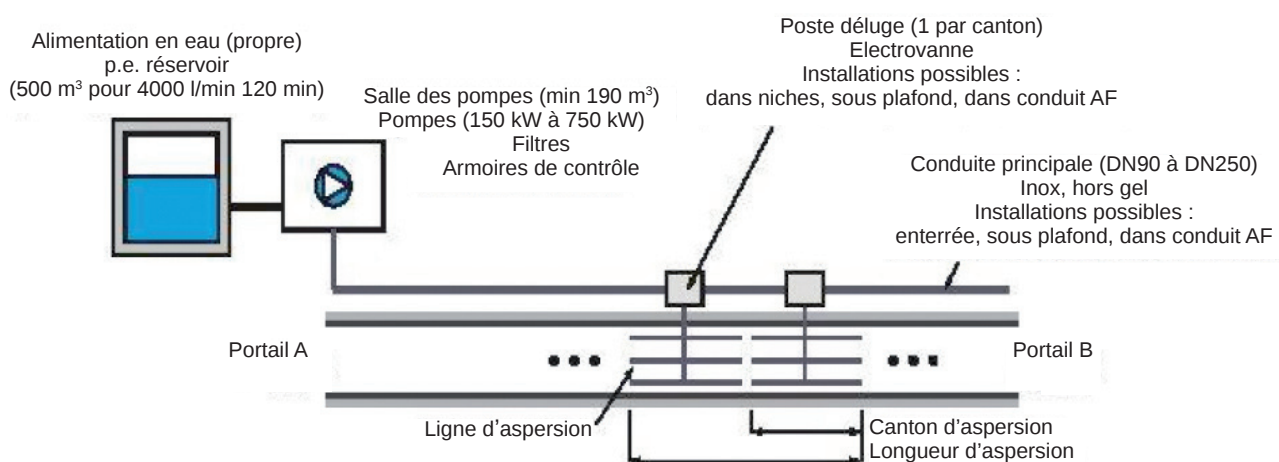


Figure 2 : Schéma de principe de l'installation d'un SFLI et des équipements annexes en tunnel

MAINTENANCE D'UN SYSTÈME D'ASPERSION PAR BROUILLARD D'EAU EN TUNNEL

Les opérations de maintenance sur les systèmes d'aspersion par brouillard d'eau sont relativement similaires à celles que l'on attend pour les systèmes sprinklers utilisés dans les bâtiments. Les principales opérations de maintenance sont bien détaillées dans les normes américaines NFPA13⁴, 15⁵ et 750. Parmi celles-ci, on peut notamment retenir :

- **tous les mois :**
 - contrôle du démarrage des pompes
 - contrôle visuel des équipements de la salle des pompes
- **tous les 6 mois à 1 an :**
 - test des pompes (débits, pression)
 - test des alarmes
 - contrôle visuel de la tuyauterie
 - contrôle du fonctionnement des vannes télécommandées (« postes déluge »)
 - contrôle visuel des structures de jet d'aspersion
 - contrôle des filtres
- **tous les 5 ans au maximum :**
 - changement des joints et des filtres.

La lutte contre l'encrassement des buses du fait de la pollution résiduelle présente dans les tunnels est un point important de la maintenance d'un système d'aspersion par brouillard d'eau.

Certains fabricants proposent de protéger les buses par des capuchons amovibles qui seront expulsés par la pression de l'eau lors de l'activation du système. La mise en place de tels capuchons de protection implique une opération de maintenance supplémentaire : la remise en place des capuchons de protection après chaque activation. D'autres fabricants pensent qu'il est possible de s'affranchir de ces capuchons pour les systèmes d'aspersion par brouillard d'eau à haute pression qui lors de leur activation entraîneront les particules de saleté. Ils mènent des études expérimentales sur l'encrassement des buses en tunnel dont nous n'avons pas pour le moment les résultats.

La lutte contre l'encrassement des organes de faible diamètre du système d'aspersion par brouillard d'eau est un autre point important de la maintenance. Toutes les précautions d'usage au niveau des filtres doivent être prises pour limiter ce phénomène difficilement décelable.

Les coûts de maintenance d'un système d'aspersion par brouillard d'eau sont estimés à environ 40 k€ par an et par kilomètre de tube équipé [8]. Ce chiffre ne prend pas en compte les coûts induits par la fermeture du tunnel lors de certaines opérations de maintenance, mais ceux-ci peuvent être non négligeables, notamment pour des tunnels à péage.

EFFETS D'UN SYSTÈME FIXE DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE

3.1 TEMPÉRATURE ET RAYONNEMENT

3.1.1 Réduction de la température des gaz

L'aspersion de gouttelettes par brouillard d'eau a un effet indiscutable sur la réduction de la température des gaz (cf. fig. 3). Ce phénomène a été mis en évidence dans tous les essais avec brouillard d'eau (voir [4], [5] et [10]). Cette réduction est avant tout liée au transfert thermique entre les fumées chaudes et les gouttes d'eau qui, en s'évaporant, consomment une partie de l'énergie convectée. Cette baisse de la température des gaz peut également être accentuée par la réduction de la puissance thermique du foyer sous l'effet de la pulvérisation par brouillard d'eau (cf. § 3.2).

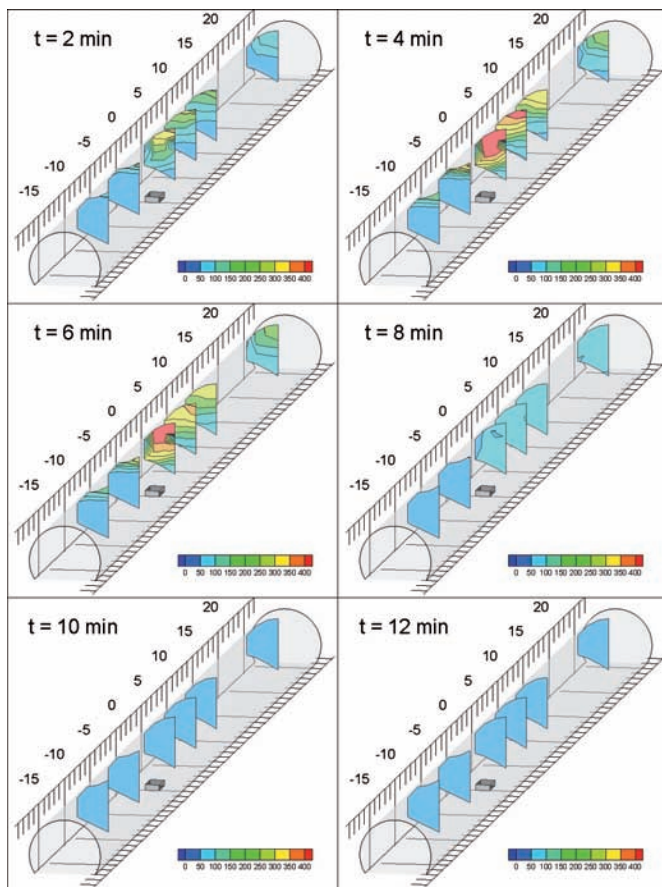


Figure 3 : Champs de température dans la galerie à échelle 1/3 pour un bac d'heptane de puissance équivalente à 30 MW (échelle réelle). Déclenchement de l'aspersion au bout de 5 min. [10]

L'activation d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau entraîne inévitablement une homogénéisation des températures des gaz sur toute la hauteur de la section du tunnel. En effet, elle provoque une déstratification des fumées au droit du ou des cantons d'aspersion activés, qui est due au refroidissement des fumées, à l'entraînement vers le bas des fumées par le flux d'aspersion et à l'augmentation de la turbulence. Toutefois, cette modification du profil des températures ne semble pas augmenter les températures des gaz en partie basse.

La réduction de la température sous l'effet d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau s'accompagne d'une augmentation de l'humidité relative de l'air. La présence d'une grande quantité d'eau dans l'air modifie les conditions de tenabilité en tunnel. En effet, les risques de brûlures corporelles ou du système respiratoire apparaissent pour une température supérieure à 80°C lorsque l'air est saturé en eau, alors qu'ils apparaissent pour une température supérieure à 120°C dans le cas où l'air est sec. Lorsque l'air est saturé en eau, une température de 60°C reste néanmoins supportable pendant environ 30 minutes.

3.1.2 Atténuation du rayonnement

L'aspersion de gouttelettes par brouillard d'eau a également un effet indiscutable sur l'atténuation du rayonnement. En effet, elle permet de créer un écran au flux de chaleur rayonné par le foyer. Cet effet d'écran se caractérise par l'absorption d'une partie de l'énergie rayonnée par les gouttes d'eau. Cette partie est d'autant plus importante que le diamètre des gouttes se rapproche de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du rayonnement⁶.

Les mesures réalisées lors des essais de Hagerbach pour le tunnel de l'A86 [5] à 10 m en aval du foyer montrent que le flux de chaleur total, c'est-à-dire regroupant les flux de chaleur convecté et rayonné, diminue sous l'effet de l'aspersion par brouillard d'eau (cf. fig. 4).

⁶ : pour une source considérée comme un corps noir de 1300 K la longueur d'onde de l'onde électromagnétique est de l'ordre de 2 µm.

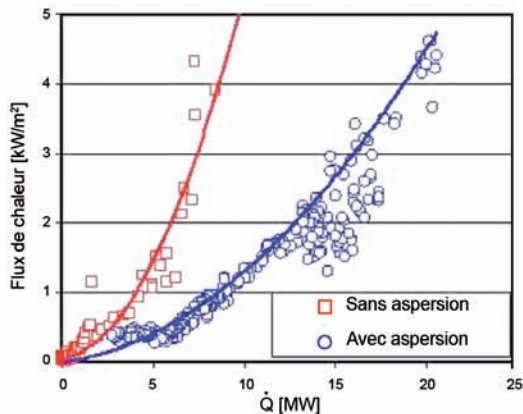


Figure 4 : Exemple de comparaison du flux de chaleur rayonné avec et sans aspersion [5]

3.1.3 Propagation du feu

La limitation de la propagation du feu est un autre effet important d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau.

En effet, la diminution du flux de chaleur radiatif, associée à la diminution de la température des gaz, limite le risque de propagation du feu d'un véhicule à l'autre. Cet effet est indiscutable dans le cas de feu de solide, mais plus discutable dans le cas d'un feu de nappe où il peut exister un risque de propagation, comme par exemple dans un tunnel urbain présentant une forte pente. L'aspersion d'eau sur un hydrocarbure peut en effet augmenter la quantité de liquide susceptible de ruisseler sur la chaussée et ainsi induire un risque de propagation de l'incendie à un autre véhicule.

3.2 PUISSANCE THERMIQUE DU FOYER

L'effet et l'efficacité d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau sur la puissance thermique d'un foyer diffèrent selon la nature du combustible, liquide ou solide, et le caractère confiné ou non du foyer.

3.2.1 Cas d'un foyer liquide non caché

Lorsque le combustible est un liquide et que le foyer n'est pas caché, l'aspersion par brouillard d'eau peut permettre de réduire de près de 50 % la puissance thermique dégagée par le foyer comme le montrent les essais réalisés dans le cadre du projet de recherche UPTUN (cf. fig. 5).

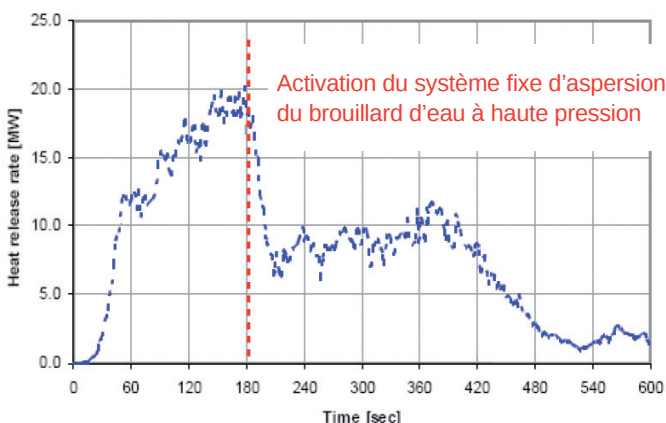


Figure 5 : Exemple de l'effet d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau sur la puissance thermique dégagée par un foyer constitué de 3 bacs d'heptane [4]

Les principaux phénomènes permettant d'expliquer cette réduction sont connus et peuvent être modélisés :

- absorption de chaleur par les gouttes lors de leur vaporisation dans la flamme,
- réduction du flux de chaleur incident sur la surface du combustible provenant de la flamme,
- réduction du taux de vaporisation du combustible, c'est-à-dire du débit de combustible vaporisé, qui détermine la puissance du foyer de façon proportionnelle.

D'autres phénomènes secondaires plus complexes sont difficiles à modéliser. Par exemple, lorsqu'une goutte se vaporise dans la flamme, la vapeur d'eau créée occupe un volume plus important que la goutte d'eau. Cette expansion crée une légère dépression au sein de la flamme qui produit un effet d'appel et un apport en oxygène qui provoquent une augmentation de la puissance thermique du foyer. Cet effet s'observe surtout au début de l'aspersion et se stabilise assez rapidement.

3.2.2 Cas d'un foyer solide non caché

Lorsque le combustible est un solide, le mécanisme de création de gaz combustibles ne se fait plus à partir de la vaporisation du combustible comme c'est le cas pour un foyer liquide, mais à partir de la pyrolyse des corps organiques contenus dans le solide. Ces corps organiques sont en général composés de molécules qui forment une chaîne polymère (plastique, caoutchouc, bois...). Sous l'effet de la chaleur, cette chaîne se rompt et libère des molécules volatiles qui brûlent au contact de l'oxygène présent dans l'air.

Dans le cas d'un combustible liquide, la production de gaz combustibles est due au flux de chaleur incident sur la surface de ce combustible provenant de la flamme, alors que, dans le cas d'un combustible solide, elle est due, en grande partie, à la température de surface du solide. L'aspersion par brouillard d'eau sur un foyer solide non caché va, de la même manière que pour un foyer liquide non caché, réduire le flux de chaleur incident sur la surface du combustible. Toutefois, le fait que la quasi-totalité des gouttelettes soit vaporisée avant d'atteindre la surface du combustible empêche le brouillard d'eau de refroidir significativement le combustible en son sein. L'aspersion par brouillard d'eau est donc moins efficace pour réduire le mécanisme de pyrolyse d'un combustible solide que celui de vaporisation d'un combustible liquide.

La pyrolyse est une décomposition physique et chimique du solide qu'il est très difficile de modéliser, tant les phénomènes intervenant sont complexes. L'appréciation de la réduction de la puissance d'un foyer solide non caché sous l'effet d'un système de lutte contre le feu est ainsi délicate. Elle ne peut se faire qu'en réalisant des essais sur des foyers solides calibrés non cachés avec et sans aspersion.

3.2.3 Cas d'un foyer, liquide ou solide, caché

Le confinement, partiel ou total, d'un foyer, qu'il soit liquide ou solide :

- empêche l'eau d'atteindre la surface du foyer,
- limite la réduction, par le système fixe d'aspersion d'eau, du flux de chaleur incident sur la surface du combustible provenant de la flamme.

Le premier effet intéresse davantage les systèmes fixes d'aspersion de grosses gouttes puisque, dans le cas du brouillard d'eau, les gouttes au droit du foyer sont, dans leur quasi-totalité, vaporisées avant d'entrer en contact avec la surface du combustible.

Le second effet a un impact important sur la limitation du flux de chaleur incident provenant de la flamme et atteignant la surface du combustible, et donc sur la puissance du foyer. En effet, le brouillard d'eau ne peut agir sur la totalité de la flamme, son action est limitée à la partie de la flamme accessible aux gouttelettes, où le flux de chaleur est localement réduit. Bien que le flux incident provenant des flammes soit réduit par endroit, le fait que la surface du combustible soit cachée limite cette influence. La puissance thermique du foyer n'est donc pas aussi sensiblement modifiée.

L'effet d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau sur la réduction de la puissance thermique d'un foyer partiellement ou totalement caché, que le combustible soit liquide ou solide, reste donc difficile à quantifier.

3.3 TOXICITÉ DES GAZ

L'émission de gaz toxiques par un foyer est fonction de sa puissance, de son degré de ventilation (apport en oxygène) et de la nature du combustible. La production de dioxyde de carbone (CO_2) dépend presque exclusivement de la puissance de l'incendie, alors que celles de monoxyde de carbone (CO) et d'oxydes d'azote (NO_x) dépendent également du degré de ventilation.

Ainsi, l'utilisation d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau a pour effet de réduire la production de dioxyde de carbone (CO_2) induite par la réaction de combustion. Cette réduction est délicate à quantifier puisqu'elle est liée à la réduction de la puissance du foyer qui est elle-même incertaine. L'appréciation qualitative et quantitative de l'effet d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau sur la production de CO et de NO_x reste beaucoup plus difficile.

Par ailleurs, ces trois types de gaz possèdent des propriétés chimiques qui les rendent très peu solubles dans l'eau dans les conditions de température et de pression d'un incendie.

Les essais d'Hagerbach [5] ont d'ailleurs confirmé que ces gaz n'étaient pas dissous sous l'effet d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau. En revanche, d'autres gaz toxiques peuvent être libérés par le foyer, comme le chlorure d'hydrogène (HCl), le dioxyde de soufre (SO_2) ou le cyanure d'hydrogène (HCN), qui sont eux très solubles dans l'eau. La dissolution de ces gaz peut former des solutions acides très corrosives et dangereuses. L'analyse de l'eau présente sur la chaussée après les essais d'aspersion d'Hagerbach a révélé un pH de l'ordre de 2. En l'état actuel des connaissances, il est impossible de quantifier les phénomènes liés à la dissolution de certains gaz solubles dans les conditions de température et de pression de l'incendie.

Enfin, la déstratification des fumées due à l'activation d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau entraîne une augmentation de la concentration des gaz toxiques au niveau des usagers, ce qui est néfaste pour les usagers lors de la phase d'auto-évacuation.

3.4 CONDITIONS DE VISIBILITÉ

En présence de fumées, les conditions de visibilité peuvent être fortement dégradées en partie basse de la section sous l'effet d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau. Ceci est dû à la déstratification des fumées au droit du ou des cantons d'aspersion activés – dans le cas où une certaine stratification préexistait à l'activation du système. Cet effet est notamment illustré par les mesures réalisées sur maquette [10] (cf. fig.6).

Ces conditions de visibilité dépendent des quantités de particules de suie et de gouttes de brouillard d'eau présentes dans l'air, de la taille des gouttes, ainsi que du mode d'éclairage du tunnel. Ce dernier point n'a fait pour l'heure l'objet d'aucune étude. L'éventuel lessivage des suies par le brouillard d'eau est difficile à mettre en évidence tant sur le plan quantitatif que sur celui de la cinématique. Il n'est en effet pas mesurable et diffi-

cilement modélisable puisque les particules de suie et les gouttes du brouillard d'eau se distribuent sur une large gamme de diamètres qui dépend respectivement du type de combustible et des modalités d'aspersion. La réduction de visibilité induite par la présence en grande quantité de gouttes de brouillard d'eau dans l'air est également difficile à mesurer et à modéliser. En outre, la vapeur d'eau créée au voisinage de l'incendie peut, sous l'effet du courant d'air longitudinal, se condenser à l'aval de l'incendie et générer un brouillard.

En l'absence de fumées, les conditions de visibilité sont également dégradées par l'activation d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau, mais cette dégradation n'empêche pas l'auto-évacuation des usagers.

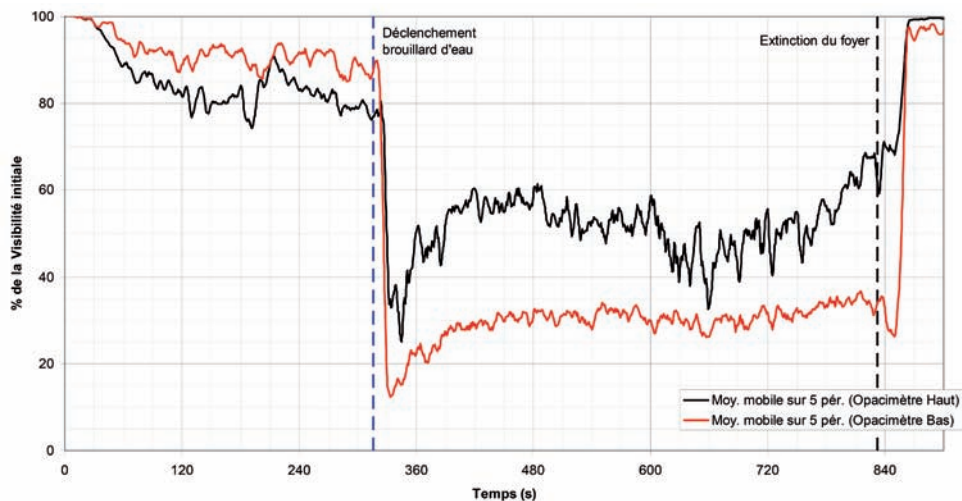


Figure 6 : Exemple de l'effet d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau sur la visibilité [10]

3.5 SYNTHÈSE DES EFFETS D'UN SFLI

En l'état actuel des connaissances, les effets d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau sur les conditions ambiantes en tunnel peuvent se résumer comme suit.

	amélioration certaine	amélioration probable	effet incertain	absence d'effet	détérioration certaine
température et rayonnement	réduction de la température et du rayonnement *				diminution de la tenabilité à la température à cause de l'augmentation de l'humidité relative de l'air
propagation de l'incendie	limitation de la propagation du foyer (combustible solide)		limitation de la propagation du foyer (nappe avec tunnel à forte pente)		
puissance du foyer		réduction de la puissance du foyer **			
toxicité des gaz		réduction des émissions toxiques **	risque de création d'acides	lessivage des gaz toxiques	perte de la stratification éventuelle
visibilité				lessivage des suies	dégradation limitée des conditions de visibilité en l'absence de fumée perte de la stratification éventuelle des fumées

* mais modification du profil des températures

** ces réductions ne semblent pas suffisantes pour assurer dans tous les cas la tenabilité dans les fumées

Tableau 4 : Effets d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau sur les conditions ambiantes en tunnel en l'état actuel des connaissances

4 ÉLÉMENTS PROVISOIRES D'APPRÉCIATION DE L'UTILISATION DE SYSTÈMES FIXES D'ASPERSION PAR BROUILLARD D'EAU DANS UN TUNNEL ROUTIER

4.1 OBJECTIFS RECHERCHÉS ET MODALITÉS D'ACTIVATION

Deux types d'objectifs (qui peuvent se combiner) peuvent conduire à envisager l'installation d'un système d'aspersion par brouillard d'eau :

- La mise en place d'une aspersion peut être conçue dans le strict cadre des exigences fixées par la réglementation (l'instruction technique [13] principalement), en s'en tenant aux hypothèses et objectifs de celle-ci. Ainsi, le but peut être d'utiliser l'aspersion pour compenser le niveau réduit de certaines autres dispositions de sécurité posant des problèmes, par exemple de faisabilité ou d'exploitation, voire trop coûteuses. Un autre but peut être d'atteindre des objectifs autres que de sécurité, comme par exemple la protection du tunnel afin de limiter les dommages en cas d'incendie, et réduire ainsi le coût et la durée des réparations. Dans tous les cas, il convient de vérifier que l'installation d'un système fixe d'aspersion ne nuit pas à la sécurité du tunnel. Ce point est traité au § 4.1.1.
- Dans une deuxième optique, l'aspersion peut viser à augmenter le niveau de sécurité d'un tunnel en allant au-delà des exigences de la réglementation, afin de couvrir des situations plus sévères que celles qui servent normalement de base au dimensionnement des mesures de sécurité. Ce deuxième type d'objectif est examiné au § 4.1.2.

Dans tous les cas, les effets de l'aspersion sont étroitement liés au moment où celle-ci est activée ; cette question est introduite au § 4.1.3 et sert de fil conducteur pour la suite du chapitre (§ 4.2 et suivants).

4.1.1 Assurer le niveau de sécurité prescrit

Par son action, un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau peut améliorer, mais également détériorer certaines des conditions ambiantes régnant en tunnel lors d'un incendie (cf. tab. 4). Il est donc indispensable, avant d'envisager une installation, de faire le bilan des effets favorables, mais aussi des effets indésirables d'un tel système, en tenant compte de l'ensemble des éléments de sécurité présents. Ceci doit être réalisé dans une approche systémique de la sécurité, desti-

née à apprécier le rôle et les effets de l'aspersion vis-à-vis des objectifs recherchés dans le cadre des stratégies de sauvegarde, à savoir (cf. § 1.1.2) :

- permettre aux usagers de s'auto-évacuer,
- permettre la survie jusqu'à l'arrivée des services de secours des personnes qui ne se sont pas autoévacuées,
- faciliter l'action des services de secours pour, d'une part, aider les usagers à évacuer, et d'autre part, lutter contre l'incendie,
- protéger l'infrastructure du tunnel.

La possibilité d'avoir recours à un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau en complément des autres éléments de sécurité du tunnel, voire pour compenser le niveau réduit de certains, ne peut donc être analysée sans apprécier les conséquences de son activation sur ces stratégies de sauvegarde, qui dépendent fortement des principes de désenfumage retenus, ainsi que du type de circulation dans le tunnel. L'analyse de l'interaction entre un tel système et le système de ventilation est donc un élément essentiel de la réflexion à mener avec une approche globale de la sécurité dans l'ouvrage.

4.1.2 Augmenter la robustesse du système

L'installation d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau peut, en outre, être envisagée dans le but d'augmenter le niveau de sécurité du tunnel, étant entendu qu'il convient *a minima* de ne pas le réduire comme décrit au § 4.1.1. La décision doit alors reposer sur une analyse qui intègre les situations particulières ou événements mettant en défaut les stratégies de sauvegarde, c'est-à-dire allant au-delà des hypothèses et objectifs de l'instruction technique du 25 août 2000 [13].

En effet, en l'absence d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau, la sécurité en cas d'incendie repose essentiellement sur la stratégie de désenfumage retenue qui peut être soit le désenfumage longitudinal, soit le désenfumage transversal. Or, ces deux stratégies peuvent être mises en défaut lors de situations particulières.

La stratégie de désenfumage transversal repose sur la capacité à limiter le courant d'air longitudinal pour maintenir autant que

faire se peut la stratification naturelle des fumées et les extraire en plafond, favorisant ainsi la présence de conditions ambiantes acceptables sous la couche de fumées. Or, cette stratégie est mise en défaut dans les cas où la puissance thermique de l'incendie ou les contre-pressions atmosphériques présentes aux têtes du tunnel lors de l'incendie sont supérieures à celles retenues pour le dimensionnement :

- Dans le premier cas, le volume des fumées à extraire est tel que, malgré la présence des installations de ventilation permettant leur extraction en plafond, les fumées s'accumulent dans la section, occupent toute la hauteur du tunnel et gagnent les zones adjacentes.
- Dans le second cas, l'impossibilité de maîtriser le courant d'air longitudinal rend plus difficile et aléatoire la stratification naturelle des fumées dans la zone d'extraction. Elle empêche surtout leur cantonnement dans cette zone, entraînant alors rapidement des fumées en-dehors de cette zone sur toute la hauteur du tunnel.

La stratégie de désenfumage longitudinal consiste quant à elle à créer un courant d'air longitudinal suffisamment fort pour pousser les fumées vers l'un des côtés du tunnel, garantissant ainsi de bonnes conditions ambiantes de l'autre côté de l'incendie. Or, cette stratégie est mise en défaut dans le cas où la circulation est bloquée à l'aval de l'incendie par un incident, un accident ou par la présence d'un bouchon. Dans ce cas, cette stratégie de désenfumage expose les usagers présents à l'aval de l'incendie à la température et à la toxicité des gaz émis par le foyer de l'incendie.

4.1.3 Modalités d'activation

L'analyse réalisée pour juger de l'intérêt d'installer un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau dans un tunnel en fonction des objectifs recherchés doit aborder la question centrale des

modalités de mise en œuvre de ce système qui peut être activé :

- soit dès la détection de l'incendie,
- soit à l'arrivée des services de secours,
- soit après l'évacuation de tous les usagers, avec ou sans l'aide des services de secours.

Selon le moment choisi pour son activation, l'aspersion peut ou non modifier les conditions d'auto-évacuation, les conditions de survie des usagers ou les conditions d'intervention des services secours. En revanche, dans tous les cas, son activation permet de limiter les dommages au tunnel en réduisant les sollicitations thermiques subies par l'infrastructure, cette réduction étant d'autant plus importante que ce système est activé tôt.

Le moment d'activation de l'aspersion ne peut donc être choisi qu'après avoir analysé ses effets sur la stratégie retenue par les services de secours pour leur action, mais surtout, sur la stratégie mise en œuvre pour que les personnes présentes dans le tunnel puissent sortir saines et sauvées. Ces stratégies reposent sur un déroulement des opérations de sécurité en deux phases :

- la phase d'auto-évacuation dont l'objectif est la sauvegarde des usagers quand ils sont seuls dans le tunnel,
- la phase d'intervention des services de secours dont l'objectif prioritaire est de contribuer à sauver les personnes encore présentes dans le tunnel avant de se consacrer à la lutte contre l'incendie.

La durée de ces phases dépend du moment où les services de secours arrivent sur place, mais également des conditions de tenabilité dans le tunnel pour les usagers et les services de secours. L'enchaînement des différents temps de tenabilité est présenté sur le diagramme à la figure 7.

Les paragraphes qui suivent examinent l'effet de l'aspersion d'un brouillard d'eau selon le moment où elle est déclenchée.

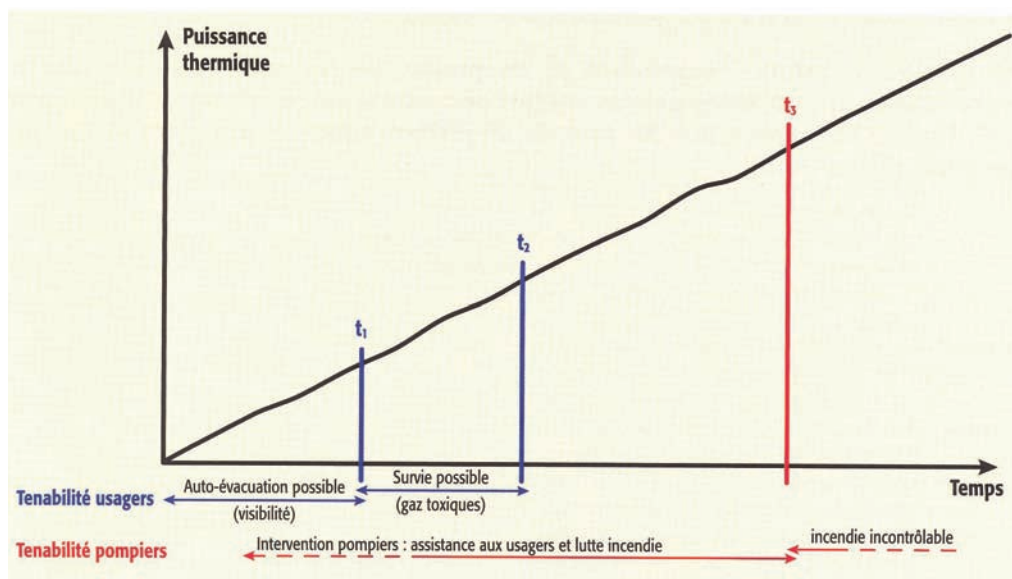


Figure 7 : Enchaînement des différents temps de tenabilité qui caractérisent la capacité d'un être humain à supporter les conditions ambiantes hostiles

4.2 EFFETS D'UNE ACTIVATION PENDANT LA PHASE D'AUTO-ÉVACUATION DES USAGERS

La phase d'auto-évacuation commence dès l'instant où l'incendie n'est plus contrôlable par les usagers ou par les moyens propres de l'exploitant, et se termine lors de l'arrivée des services de secours.

Durant cette phase, il est essentiel que les usagers disposent de bonnes conditions de visibilité afin de localiser les issues de secours et de pouvoir auto-évacuer dans de bonnes conditions (cf. tab. 1). Pour cela, les stratégies de désenfumage consistent soit à favoriser la stratification des fumées, soit à pousser les fumées dans le sens du trafic vers l'extérieur du tunnel. En l'absence d'un système d'aspersion d'eau, ces stratégies de désenfumage répondent à l'objectif de maintien de la visibilité pour les usagers tant qu'elles ne sont pas mises en défaut par l'une des situations particulières décrites dans le paragraphe 4.1.2. En effet, ces dernières peuvent entraîner la présence d'usagers dans des zones totalement enfumées et limiter leur capacité à s'autoévacuer.

Ainsi, on peut distinguer, selon la stratégie de désenfumage et la présence ou non d'une situation particulière, trois scénarios d'auto-évacuation des usagers :

- les usagers auto-évacuent dans des zones exemptes de fumées,
- les usagers auto-évacuent sous une couche de fumées, celles-ci étant stratifiées,
- les usagers auto-évacuent dans des zones remplies de fumées sur toute la hauteur de la section du tunnel.

4.2.1 Activation dans une zone exempte de fumées

Dans les zones exemptes de fumées, l'aspersion par brouillard d'eau dégrade légèrement les conditions de visibilité dans la zone aspergée, sans toutefois empêcher l'auto-évacuation des usagers.

4.2.2 Activation avec présence de fumées stratifiées

Usagers situés dans la zone d'aspersion

Dans les zones où les fumées sont stratifiées, l'aspersion par brouillard d'eau entraîne une déstratification des fumées qui dégrade fortement les conditions de visibilité.

À cette dégradation s'ajoute celle des conditions de tenabilité pour les usagers puisque la déstratification des fumées augmente la quantité de gaz toxiques présents à hauteur d'homme. Cet effet négatif devrait être tempéré par une diminution de la production de gaz toxiques par le foyer, mais celle-ci reste incertaine en l'état actuel des connaissances.

En revanche, même si, sous l'effet de cette déstratification, l'homogénéisation des températures sur toute la hauteur de la section du tunnel modifie la température de l'air à hauteur d'homme, l'expérience tend à montrer qu'elle reste supportable pour les usagers, malgré un fort taux d'humidité.

Par ailleurs, dans le cas d'une stratégie de désenfumage transversal, la déstratification des fumées, associée au mouvement vers le bas des gouttelettes du brouillard d'eau, rend plus difficile l'extraction des fumées dans la zone d'aspersion. En contrepartie, il est probable que les fumées seront présentes en moindre quantité sous l'effet de la diminution de la puissance thermique dégagée par l'incendie et de la température.

Globalement, il semble que les conditions d'auto-évacuation des usagers présents dans la zone d'aspersion soient dégradées.

Usagers situés en dehors de la zone d'aspersion

Pour les raisons évoquées dans le paragraphe 2.3 du présent document, la longueur de la zone d'aspersion est d'environ 100 à 150 m, alors qu'en cas de désenfumage transversal, celle du canton d'extraction des fumées est de 200 m pour les tunnels à gabarit réduit, de 400 m pour les tunnels urbains et de 600 m pour les tunnels non urbains. Cet écart entre la longueur d'aspersion et les longueurs d'extraction pose le problème des conséquences de l'activation d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau sur les conditions d'auto-évacuation des usagers situés en-dehors de la zone d'aspersion. Deux cas sont ainsi à distinguer :

- le cas où les fumées sont cantonnées et stratifiées grâce à un courant d'air de vitesse quasi nulle au droit de l'incendie,
- le cas où les fumées ne sont pas cantonnées, mais sont stratifiées sur une certaine distance.

• Premier cas : fumées cantonnées

Le premier cas correspond à une situation de désenfumage transversal où la vitesse du courant d'air longitudinal est

quasiment nulle au droit de l'incendie (cf. fig. 8), soit du fait de l'absence d'une différence de pression entre les têtes du tunnel, soit grâce à la mise en œuvre d'un système de contrôle du courant d'air longitudinal efficace.

Lors de l'activation d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau, l'évaporation des gouttes entraîne la création d'un volume de vapeur dans l'ensemble de la zone aspergée (cf. zone A de la fig. 8), ainsi qu'une diminution importante de la température de l'air. Les observations faites dans de tels cas de figure semblent montrer que la déstratification des fumées ne se produit pas en dehors de la zone d'aspersion.

En effet, la forte baisse des températures dans la zone aspergée réduit notablement la force motrice des fumées. Leur masse volumique reste cependant inférieure à celle de l'air ambiant. Si cette différence est suffisante, la propagation des fumées au-delà de la zone aspergée (zone B, fig. 8) peut se faire sous forme de nappes stratifiées. L'épaisseur de ces nappes serait *a priori* réduite par rapport à la situation sans aspersion.

Les effets dynamiques du spray d'aspersion, qui forme une sorte de rideau, peuvent également contribuer à limiter la propagation des fumées au-delà de la zone aspergée.

Les conditions d'auto-évacuation des usagers situés dans ces zones sont donc probablement améliorées.

• **Second cas : fumées non cantonnées**

Le second cas correspond le plus souvent à une situation de désenfumage transversal où le courant d'air longitudinal n'est pas maîtrisé et entraîne les fumées en-dehors du canton d'extraction (cas représenté par la figure 9). D'un côté du canton d'extraction, il existe un courant d'air assez fort (à gauche sur la figure) orienté vers le foyer. À l'autre extrémité du canton, on trouve soit un courant d'air de même sens, soit un courant d'air

orienté vers le foyer mais trop faible pour cantonner les fumées. Ce cas peut aussi correspondre à un désenfumage longitudinal utilisé en régime réduit, par exemple en cas de congestion à l'aval du feu. Dans cette situation, le courant d'air a la même orientation partout dans le tunnel.

Comme dans le cas précédent et pour les mêmes raisons, l'activation d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau aura tendance à limiter l'alimentation des couches de fumées situées en plafond en dehors de la zone d'aspersion (cf. zones B et C de la fig. 9). S'il ne se produit pas d'inversion du sens du courant d'air dans le tunnel, la stratification des fumées détruite par l'aspersion ne peut être retrouvée en aval (fig. 9, schéma du milieu). Les fumées sont alors entraînées vers la tête de l'ouvrage en occupant toute la section.

Si le courant d'air s'inverse (figure 9, schéma du bas), la stratification peut réapparaître sous une forme plus ou moins marquée, à condition que l'inversion soit suffisamment nette et stable. Il est cependant difficile de quantifier ce phénomène et ses conditions d'existence. Il se peut aussi qu'après activation de l'aspersion, on obtienne un cantonnement initialement absent car la force motrice des fumées aura diminué et le courant d'air nécessaire au cantonnement sera plus faible.

La conséquence pour les usagers qui étaient situés sous la couche de fumées stratifiées (cf. zone B de la fig. 9) avant que le système d'aspersion par brouillard ne soit activé est donc probablement une dégradation des conditions de visibilité et une augmentation de la toxicité des gaz respirés lors de leur auto-évacuation. Le niveau de toxicité devrait être limité par une diminution de la production de gaz toxiques par le foyer, mais celle-ci reste incertaine en l'état actuel des connaissances.

La situation est différente pour les usagers situés sous le vent et en-dehors du canton d'extraction éventuel (cf. zone C de la fig. 9), car ils se trouvent souvent dans une zone remplie de

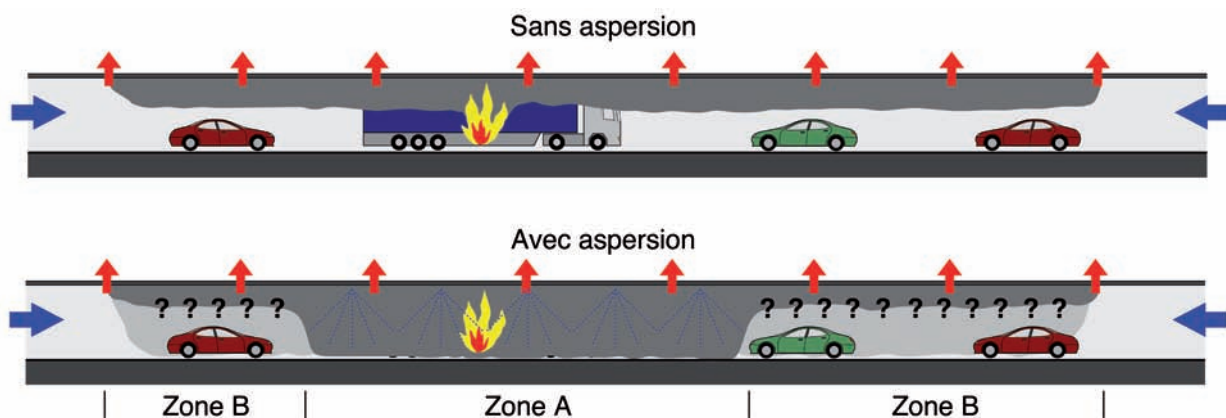


Figure 8 : Fumées stratifiées et cantonnées

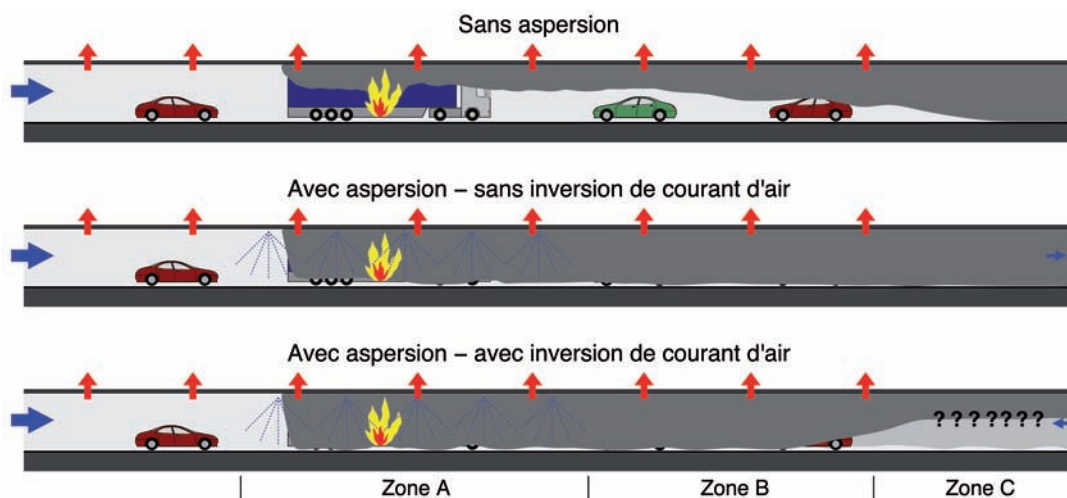


Figure 9 : Fumées stratifiées dans la zone du foyer mais pas cantonnées

fumées sur toute la hauteur de la section avant que le système d'aspersion ne soit activé. Après son activation, les conditions peuvent évoluer de différentes manières en fonction du degré de maîtrise du courant d'air : restratification plus ou moins marquée, voire disparition complète des fumées, ou persistance de fumées déstratifiées.

Dans les deux premiers cas, les conditions d'auto-évacuation des usagers sont améliorées. Dans le second cas, l'effet de l'aspersion du brouillard d'eau est semblable à ce qui est décrit ci-après au § 4.2.3 pour le cas des fumées déstratifiées (cas a).

Bilan pour les usagers

Activer un système fixe d'aspersion d'eau en présence de fumées stratifiées dès la détection de l'incendie, c'est-à-dire pendant la phase d'auto-évacuation des usagers, peut entraîner ou non une dégradation des conditions d'auto-évacuation selon la position des usagers et la situation d'incendie.

La dégradation de ces conditions est certaine pour les usagers situés dans la zone aspergée. En revanche, elle est plus difficile à qualifier pour les usagers situés en dehors de cette zone. En effet, pour ceux-ci, la dégradation des conditions d'auto-évacuation semble avant tout liée à la présence d'un courant d'air longitudinal non maîtrisé.

4.2.3 Activation avec présence de fumées déstratifiées

Lorsqu'une aspersion par brouillard d'eau est activée dans une zone où les fumées ne sont pas stratifiées au préalable, elles demeurent bien sûr déstratifiées.

En dehors de la zone aspergée, des fumées peuvent être présentes dans deux situations qui peuvent éventuellement se cumuler :

- Un courant d'air longitudinal pousse les fumées en dehors de la zone aspergée. Cette situation se rencontre systématiquement en désenfumage longitudinal, où les fumées n'ont aucun autre moyen de s'échapper, et peut se produire en désenfumage transversal si le contrôle du courant d'air longitudinal est insuffisant. Dans ce cas, les conditions de visibilité dans la zone non aspergée ne sont pas modifiées par l'aspersion par brouillard d'eau en amont et restent donc mauvaises. La déstratification préalable à l'aspersion perdure une fois l'aspersion activée.
- L'incendie dégage une puissance thermique supérieure à celle retenue pour le dimensionnement d'un système de désenfumage transversal. Dans ce cas, les capacités d'extraction des fumées peuvent être insuffisantes malgré la réduction de la puissance de l'incendie et la limitation de sa propagation sous l'effet de l'aspersion

par brouillard d'eau. Une partie des fumées se propage alors au-delà de la zone aspergée. Si la vitesse du courant d'air longitudinal est proche de zéro au droit de l'incendie, il se peut qu'une restructuration des fumées se produise en-dehors de la zone d'aspersion. Cette restructuration entraînerait alors une amélioration des conditions de visibilité en-dehors de la zone aspergée. Toutefois, en l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de savoir si ce phénomène se produit réellement et dans quelles conditions. S'il ne se produit pas de restructuration, la situation est semblable au cas précédent.

En l'absence de bonnes conditions de visibilité, ce sont les conditions de tenabilité, et plus particulièrement la toxicité des gaz respirés, qui deviennent alors importantes pour les usagers qui cherchent à auto-évacuer où qui doivent attendre l'arrivée des services de secours. Dans de tels cas, l'aspersion par brouillard d'eau semble capable de diminuer la température de l'air de manière suffisante pour qu'elle devienne supportable malgré son fort taux d'humidité. En outre, sous réserve qu'elle réduise significativement les émissions de gaz toxiques, l'aspersion par brouillard d'eau améliore et prolonge sans doute les conditions de tenabilité pour les usagers situés dans la zone d'aspersion et en-dehors.

4.2.4 Synthèse

La décision d'activer un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau pendant la phase d'auto-évacuation est extrêmement délicate, car elle repose essentiellement sur l'état de stratification des fumées au moment de la détection de l'incendie, en lien avec la stratégie de désenfumage. En effet, le balayage de l'ensemble des situations possibles au moment de l'activation de l'aspersion montre que, selon la position des usagers et la présence ou non de fumées stratifiées, les conditions d'auto-évacuation sont soit dégradées, soit inchangées, soit améliorées. Malheureusement, l'exploitant n'est en général pas en mesure de connaître l'état des fumées au moment où il détecte l'incendie. Or, la connaissance de ces conditions est essentielle pour bien juger de l'opportunité d'activer le système d'aspersion pendant la phase d'auto-évacuation des usagers.

Par ailleurs, l'un des enjeux de cette phase réside dans la transmission aux usagers de l'ordre d'évacuer, en particulier pour ceux qui n'ont pas la perception physique de l'incendie et des risques encourus. On peut dès lors se demander comment réagiraient les usagers lors de l'activation du système. Car l'aspersion pourrait être aussi bien perçue comme un signal leur indiquant de quitter leur véhicule et de se diriger vers les issues de secours, que comme le signe qu'ils demeurent

en sécurité à l'intérieur de leur véhicule, l'aspersion d'eau leur faisant penser à tort que l'incendie va être rapidement éteint ou tout au moins maîtrisé. La présence du brouillard d'eau très mouillant peut aussi les dissuader de sortir de leur véhicule. En l'absence de certitudes sur le comportement des usagers dans une telle situation, la question reste posée.

Pour l'ensemble de ces raisons et en l'état actuel de nos connaissances, il ne paraît pas judicieux d'activer un système fixe par brouillard d'eau pendant la phase d'auto-évacuation pour les tunnels disposant d'un système de désenfumage transversal pour lesquels la stratégie est justement la recherche de stratification. Ceci s'entend bien sûr à condition que l'arrivée des services de secours soit suffisamment rapide pour que la durée de la phase d'auto-évacuation demeure raisonnable (de l'ordre de 10 à 15 minutes). Au-delà de cette durée, l'aspersion pourrait être activée, d'une part car les conditions de visibilité risquent de toutes façons de ne plus être suffisantes pour permettre l'auto-évacuation, et d'autre part car à ce moment-là, le risque d'une dégradation extrêmement rapide des conditions de tenabilité devient très important. L'aspersion pourrait éventuellement être activée plus rapidement s'il était avéré que l'importance de l'incendie ou les différences de pression atmosphériques aux têtes rendent les conditions intenable dans le tunnel avant l'arrivée des secours.

La conclusion est identique pour les tunnels équipés d'un système de désenfumage longitudinal dont l'exploitation en cas d'incendie se fait en deux phases. Cela recouvre à la fois des tunnels bidirectionnels et les tunnels unidirectionnels urbains qui présentent un risque de circulation bloquée à l'aval de l'incendie. Pour de tels tunnels, la stratégie actuelle consiste dans un premier temps à maintenir un courant d'air réduit dans le sens du trafic afin de maintenir une certaine stratification des fumées pour permettre l'auto-évacuation des usagers situés à l'aval et à l'amont de l'incendie, puis dans un second temps, si cela est utile pour les secours, à augmenter la vitesse du courant d'air longitudinal en poussant les fumées dans le sens du trafic. Pour ces ouvrages aussi, l'activation de l'aspersion pourrait être envisagée avant l'arrivée des secours dans des cas où il serait avéré que les conditions de tenabilité ne peuvent plus être assurées dans le tunnel.

En revanche, pour les tunnels équipés d'un système de désenfumage longitudinal dont l'exploitation en cas d'incendie se fait en une seule phase, le système d'aspersion par brouillard d'eau, si le tunnel en est équipé, peut en principe être activé dès la détection de l'incendie. Ceci permettrait notamment d'améliorer et prolonger les conditions de tenabilité d'usagers qui pourraient éventuellement être bloqués à l'aval de l'incendie par un événement ou un incident particulier.

EFFETS D'UNE ACTIVATION PENDANT L'INTERVENTION DES SERVICES DE SECOURS

La phase d'intervention des services de secours démarre dès leur arrivée sur place et se décompose en deux phases qui peuvent, suivant les circonstances être mises en œuvre simultanément :

- l'évacuation aidée,
- la lutte contre l'incendie.

4.3.1 Activation pour aider les usagers à évacuer

A leur arrivée, les services de secours portent en priorité assistance aux usagers qui sont encore présents en tunnel. La phase d'auto-évacuation des usagers se termine dès leur arrivée, mais les conditions de visibilité peuvent encore permettre ou non de poursuivre cette évacuation (cf. fig. 7).

Si ces conditions sont encore suffisantes, l'activation du système d'aspersion d'eau à l'arrivée des services de secours peut alors, comme dans le cas d'une activation pendant la phase d'auto-évacuation, soit dégrader, soit ne pas modifier, soit améliorer les conditions de poursuite de l'évacuation. Toutefois, contrairement à la phase d'auto-évacuation, les services de secours peuvent chercher à évaluer l'état de stratification des fumées et juger de la pertinence d'une activation du système d'aspersion par brouillard d'eau.

Dans le cas où les conditions de visibilité ne sont plus suffisantes, ce sont les conditions de tenabilité qui deviennent essentielles pour permettre la survie des usagers nécessitant une aide pour évacuer. L'activation d'un système d'aspersion par brouillard d'eau peut alors être favorable car elle permet vraisemblablement de diminuer la toxicité des gaz respirés, en réduisant l'émission de gaz toxiques par le foyer, et presque certainement de diminuer suffisamment la température de l'air pour la rendre supportable malgré son fort taux d'humidité. Ces effets sont aussi favorables pour les services de secours et peuvent faciliter leur action pour aider les usagers encore présents.

Dans de telles situations, les services de secours pourraient donc demander l'activation du système d'aspersion, s'il en existe un.

4.3.2 Activation après évacuation de tous les usagers

La capacité des services de secours à lutter contre l'incendie dépend essentiellement de la température et des effets du rayonnement qui, s'ils sont trop importants, peuvent les em-

pêcher d'approcher du foyer. En effet, ils sont habitués à se déplacer en l'absence de visibilité et sont équipés d'appareils respiratoires qui les protègent des gaz toxiques, même s'il est évident que leur action est plus facile si en outre la visibilité est bonne et l'atmosphère respirable.

L'activation d'un système d'aspersion par brouillard eau, après évacuation de tous les usagers, est indiscutablement de nature à faciliter l'action des services de secours pour lutter contre l'incendie puisqu'elle permet de réduire la température des gaz, le rayonnement, ainsi que la puissance thermique du foyer et la propagation de l'incendie.

4.3.3 Synthèse

L'activation d'un système d'aspersion par brouillard d'eau pendant l'intervention des services de secours est de nature à faciliter leur action, mais le moment d'activation du système doit être choisi judicieusement. La décision d'activation doit être prise par les services de secours.

En effet, même si en priorité les services de secours portent assistance aux usagers qui sont encore présents en tunnel, ils commencent généralement en parallèle à lutter contre l'incendie dès leur arrivée. Déclencher l'aspersion immédiatement à leur arrivée peut compliquer l'évacuation d'usagers valides encore présents dans le tunnel, dans le cas où les conditions de visibilité sont encore suffisantes pour permettre l'auto-évacuation. En revanche, en l'absence de cette situation, l'activation d'un brouillard d'eau est une aide aux services de secours car elle prolonge les conditions de tenabilité tant pour les usagers que pour les services de secours.

Pour les tunnels équipés d'un système de désenfumage longitudinal dont l'exploitation en cas d'incendie se fait en une seule phase, c'est-à-dire les tunnels unidirectionnels inter-urbains et les tunnels unidirectionnels urbains de moins de 500 m, le paragraphe 4.2.4 indique que l'éventuel système d'aspersion par brouillard d'eau peut, en principe, être activé dès la détection de l'incendie. Il peut *a fortiori* être activé par les services de secours à leur arrivée si cela n'a pas été fait auparavant. Dans les autres tunnels, il apparaît préférable, si les conditions de visibilité sont encore respectées, que le système soit activé après que les services de secours se sont assurés que tous les usagers valides ont auto-évacué ou tout au moins après qu'ils ont été localisés. Si par contre les services de secours constatent à leur arrivée que les conditions de visibilité sont insuffisantes, l'aspersion peut en principe être enclenchée immédiatement.

4.4 PROTECTION DE L'INFRASTRUCTURE

Par son action permettant de réduire à la fois la température des gaz, le rayonnement, la puissance thermique dégagée par l'incendie et la propagation de l'incendie, un système d'aspersion par brouillard d'eau permet de limiter l'échauffement de la structure du tunnel. Plus ce système sera activé tôt, plus il sera efficace pour limiter cet échauffement et donc les dommages au tunnel.

Toutefois, son activation ne doit pas nuire aux autres objectifs recherchés dans le cadre des stratégies de sauvegarde (auto-évacuation et évacuation aidée des usagers). La protection de l'infrastructure n'étant en général pas un objectif de sécurité, ou en tout cas pas le plus important, les modalités d'activation liées à la sécurité des usagers ou des services de secours doivent être prioritaires par rapport à celles liées à la protection de l'ouvrage.

4.4.1 Désenfumage longitudinal en une seule phase

Pour les tunnels équipés d'un système de désenfumage longitudinal dont l'exploitation en cas d'incendie se fait en une seule phase, l'activation du système fixe d'aspersion par brouillard d'eau dès la détection de l'incendie apparaît une solution compatible avec les objectifs de sécurité.

4.4.2 Désenfumage transversal ou longitudinal en deux phases

En revanche, pour les tunnels équipés d'un système de désenfumage transversal ou pour les tunnels équipés d'un système de désenfumage longitudinal dont l'exploitation en cas d'incendie se fait en deux phases, l'activation d'un système fixe d'aspersion par brouillard d'eau dès la détection de l'incendie ne semble pas permettre pour toutes les situations d'incendie d'améliorer la réponse aux objectifs de sécurité. La difficulté de qualifier la situation de l'incendie, et notamment l'état de stratification des fumées, dès la détection de l'incendie par l'exploitant, impose d'être prudent avant de prendre le risque d'activer un système d'aspersion d'eau pendant la phase d'auto-évacuation des usagers. La même prudence peut s'imposer pendant les premières minutes de l'intervention des services de secours afin de leur permettre de localiser les usagers nécessitant d'être secourus et de favoriser l'auto-évacuation de tous les usagers valides qui n'ont pas spontanément auto-évacué. Ce délai de latence nécessaire aux objectifs de sécurité visant plus particulièrement les usagers impose que le système d'aspersion d'eau présente une certaine résistance au

feu, de manière à ce qu'il puisse rester opérationnel si la température avant déclenchement augmente beaucoup.

4.4.3 Niveau de protection apporté par un système d'aspersion par brouillard d'eau

Même si un système d'aspersion par brouillard d'eau apporte une protection significative de l'infrastructure du tunnel, il n'offre toutefois pas la même fiabilité qu'une protection passive. Il ne peut donc être envisagé comme une alternative à la mise en place d'une protection passive dans les zones devant être protégées pour des raisons de sécurité au sens de l'instruction technique du 25 août 2000. Pour être une alternative, il faudrait garantir qu'à tout moment un tel système est bien opérationnel, ce qui n'est pas évident, et demande une maintenance irréprochable associée à des tests réguliers. En effet, le système peut être confronté à plusieurs types de défauts de fonctionnement, comme la panne d'une pompe ou d'une valve télécommandée, des détériorations d'éléments situés en piédroit dues à des chocs de véhicules, l'encrassement des buses qui peuvent modifier le spectre des gouttes et donc la performance du système, le gel... Il convient en outre d'assurer la bonne localisation du foyer et l'activation de l'aspersion en conséquence, ce qui suppose aussi le parfait fonctionnement de la détection et la bonne réaction de l'opérateur. Si le système d'aspersion a un rôle essentiel pour la sécurité du tunnel, en cas de panne, l'impact sur l'exploitation du tunnel peut être forte, et l'exploitant amené à fermer le tunnel en fonction des conditions minimales d'exploitation qu'il aura définies.

CONCLUSION

Un vif intérêt est suscité aujourd'hui par l'utilisation en tunnel routier de systèmes fixes de lutte contre l'incendie, tout particulièrement par aspersion de brouillard d'eau, du fait de leur apport attendu en matière de sécurité.

Comme le montre le présent document, la constitution et l'architecture de ces systèmes peuvent être aujourd'hui assez bien définies même si leur dimensionnement nécessite des essais de mise au point en vraie grandeur. En revanche leurs effets sur les différents paramètres d'un incendie en tunnel sont connus de façon inégale : par exemple la réduction de la température des gaz est avérée, de même que la limitation de la propagation d'un feu solide, alors que les effets sur la puissance d'un feu caché, et surtout sur la réduction des émissions de gaz toxiques, restent difficiles à apprécier. Par ailleurs, certains effets de l'aspersion peuvent jouer de façon favorable et d'autres de façon défavorable selon les circonstances.

C'est pourquoi des éléments ont été proposés pour apprécier de manière plus globale les effets d'une aspersion par brouillard

d'eau sur les fumées, en fonction notamment de l'état de stratification de celles-ci, de la situation de ventilation et du moment où l'aspersion est activée. Ces éléments sont toutefois incomplets et souvent incertains du fait des limites des connaissances actuelles. Il ne s'agit en outre que d'aspects partiels à prendre en compte dans une évaluation globale.

Il semble alors indispensable d'avoir recours à une approche systématique menée au cas par cas pour juger du rôle d'un éventuel système d'aspersion par brouillard d'eau dans la sécurité d'un tunnel routier, en tenant compte de l'ensemble des caractéristiques et équipements de celui-ci, ainsi que de son mode d'exploitation. Une telle démarche impose que les objectifs recherchés aient été clairement fixés, en relation avec le choix du moment où le brouillard d'eau sera activé. Les nombreuses incertitudes qui subsistent aujourd'hui pour mener ce type d'étude incitent à une certaine prudence avant de prendre une décision.

RÉFÉRENCES

- [1] **AIPCR Comité des tunnels routiers (C5).** *Maîtrise des Incendies et des Fumées dans les Tunnels Routiers.* Documentation technique, Association Mondiale de la Route, 1999.
- [2] **AIPCR Comité technique C3.3 exploitation des tunnels routiers.** *Tunnels Routiers : Evaluation des Systèmes Fixes de Lutte contre l'Incendie.* Documentation technique, Association Mondiale de la Route, 2008.
- [3] **H. HEJNY.** *Task 2.3: Evaluation of Current Mitigation Technologies in Existing Tunnels.* Documentation technique, UpTun, 2006.
- [4] **K. OPSTAD, J. STENSAAS, A. BRANDT.** *Task 2.4 : Development of new innovative technologies.* Documentation technique, UpTun, 2006.
- [5] **X. GUIGAS, A. WEATHERILL, V. WETZIF, C. BOUTELOUP.** *Dynamic fire spreading and water mist tests for the A86 East Tunnel.* In Tunnel Fires - Fifth International Conference. Londres, 2004.
- [6] **M. TESSON, B. BROUSSE.** *Fixed water sprinkling systems for fire control in road tunnels.* In Safety in Road and Rail Tunnels Conference. Marseille, 2003.
- [7] **P. CARLOTTI.** *An integrated safety study for the use of Fixed Fire Fighting Systems.* In NFPA World Safety Conference. Las Vegas, 2005.
- [8] **X. PONTICQ, B. BROUSSE, P. CARLOTTI, X. GUIGAS, A. WEATHERILL.** *Feasibility and safety assessments of fixed fire-fighting systems for road tunnels.* In 12th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Portoroz, Slovenia, 2006.
- [9] **X. PONTICQ, B. BROUSSE.** *Fixed fire-fighting systems for road tunnels: current status of French integrated studies.* In 2nd International Symposium on Tunnel Safety & Security. Madrid, 2006.
- [10] **E. CESMAT, X. PONTICQ, B. BROUSSE, J-P. VANTELON.** *Assessment of Fixed Fire-Fighting Systems for Road Tunnels by Experiments at Intermediate Scale.* In 3rd International Symposium on Tunnel Safety & Security. Stockholm, 2008.
- [11] **X. PONTICQ.** *Études sur les systèmes fixes d'aspersion d'eau en tunnel.* Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, 2008.
- [12] **BADORIS.** *Ressources documentaires pour les installation fixe d'extinction dans les entrepôts couverts.* Documentation technique, INERIS, 2004.
- [13] **Ministère de l'équipement, des transports et du logement.** *Annexe 2 à la Circulaire 2000-63 relative à la sécurité dans les tunnels routiers du réseau national.* 2000.



**ONT PARTICIPÉ À L'ÉLABORATION
DE CE DOCUMENT :**

Frédéric Vincent, Xavier Ponticq, Bruno Brousse,
Didier Lacroix, Marc Tesson.

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

Centre d'Études des Tunnels
25, avenue François Mitterrand
Case n°1
69674 BRON - FRANCE
Tél. 33 (0)4 72 14 34 00
Fax. 33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr

