



5. LES SYSTÈMES FIXES DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE DANS LE CADRE DES SYSTÈMES DE SÉCURITÉ DES TUNNELS

5.1. INTERACTION DES SFLI AVEC LA VENTILATION

En général, deux types de systèmes de ventilation sont utilisés dans les tunnels routiers :

5.1.1. Ventilation longitudinale

Un système de ventilation longitudinale crée un courant d'air à l'intérieur du tunnel afin d'éloigner la fumée et les gaz chauds des véhicules arrêtés et des passagers qui s'évacuent (*Figure 1*). Le but d'un système de ventilation longitudinale est de créer un courant d'air d'une vitesse suffisamment élevée pour empêcher la fumée de remonter dans la direction opposée. La vitesse limite est ce que l'on appelle la vitesse critique. En association avec un SFLI, cette grande vitesse de l'air provoque le déplacement du brouillard, des petites gouttelettes d'eau ou des petits flocons de mousse. Les essais d'incendie et les projets de recherche ont conclu que ce phénomène pouvait être combattu en :

- régulant la vitesse longitudinale de l'air, tout en veillant à éviter la remontée de fumée en amont de l'incendie,
- activant le SFLI dans les zones appropriées.



Figure 1 - Déplacement de la fumée en ventilation longitudinale [11]

L'utilisation d'un SFLI crée une résistance supplémentaire au courant d'air longitudinal. Il faut en tenir compte lors de la conception du système de ventilation longitudinale permettant d'obtenir la vitesse critique.

D'autre part, la vitesse de développement de l'incendie peut, la plupart du temps, être réduite grâce à une utilisation adéquate du SFLI. Il faut également en tenir compte en concevant le système de ventilation, ne serait-ce que pour prendre acte de ce facteur de sécurité et de flexibilité du système.

5. FIXED FIRE FIGHTING SYSTEMS IN THE CONTEXT OF TUNNEL SAFETY SYSTEMS

5.1. INTERACTION OF FFFS WITH VENTILATION

In general, two types of ventilation systems are used in road tunnels:

5.1.1. Longitudinal ventilation

A longitudinal ventilation system creates an airflow within the tunnel to push the smoke and hot gases away from the stopped vehicles and evacuating passengers (*Figure 1*). The goal of a longitudinal ventilation system is create an airflow that is high enough to prevent the smoke from backlayering in the opposite direction. This value is known as the Critical Velocity. In conjunction with a FFFS, this high air velocity causes the mist, water droplets or foam droplets to be displaced. Fire tests and research projects have concluded that this phenomenon can be fought by:

- controlling the longitudinal speed of the air, taking care of the effects on backlayering;
- activating the appropriate FFFS sections.



Figure 1 - Smoke displacement with longitudinal ventilation [11]

Use of a FFFS creates extra resistance to the longitudinal airflow. This must be accounted for when designing the longitudinal ventilation system so as to get the critical velocity.

On the other hand, the fire growth rate will, in most circumstances, be minimized by proper application of the FFFS. This should also be taken into account in designing the ventilation system, if only to note this safety factor and flexibility in the design.



5.1.2. Ventilation transversale

Les systèmes de ventilation transversale visent à maintenir la fumée stratifiée en partie haute de la section du tunnel et à l'extraire par des ouvertures à travers le plafond ou le haut des piédroits (*Figure 2*).

Les essais d'incendie et la recherche ont montré que l'activation d'un SFLI entraîne presque immédiatement une destratification. En fonction des débits de fumée et des débits de ventilation, ceci peut conduire à des distances de visibilité plus courtes. Dans des cas extrêmes, les personnes qui tentent de sortir du tunnel peuvent ne pas voir suffisamment bien pour atteindre les issues de secours.

La ténabilité de l'environnement à l'intérieur du tunnel dépend de facteurs tels que le contenu des produits de combustion, la température et l'humidité. Par conséquent, il est essentiel de tenir compte des effets d'un SFLI sur les conditions de ténabilité au moment de la conception ou de l'activation de ces systèmes. La recherche a démontré qu'un SFLI réduit la température de l'air. Cependant, si le processus de combustion l'emporte sur l'effet de refroidissement du SFLI, produit par le changement de phase de l'eau, l'impact peut être très négatif sur la ténabilité de l'environnement. Dans des pays comme le Japon et l'Australie, c'est l'une des raisons pour lesquelles un déploiement rapide du SFLI est recommandé (pour réduire autant que possible la taille de l'incendie).

Cela semble en contradiction avec la règle générale suivie par les pompiers, à savoir « sauver d'abord les personnes qui se trouvent dans une pièce et ensuite éteindre le feu ». Ce principe est d'ailleurs repris dans les publications passées de l'AIPCR (voir par exemple [2]).



Figure 2 - Stratification de la fumée en ventilation transversale [11]

La probabilité que l'incendie progresse jusqu'à atteindre sa puissance maximale diminue si un SFLI est utilisé correctement. On pourrait ainsi obtenir le même niveau de sécurité avec une conception plus flexible du système.

Le SFLI fait baisser la température de la fumée et, par conséquent, diminue le volume du mélange air/fumée dans le tunnel ou le conduit d'extraction. Ce facteur va dans le sens d'une amélioration des conditions d'évacuation.

5.1.2. Transverse ventilation

Transverse ventilation systems aim at maintaining smoke stratified near the ceiling and extracting it by openings through the ceiling or the top of the walls (*Figure 2*).

Fire tests and research have shown that activating a FFFS will almost immediately cause destratification. Depending upon smoke volumes and ventilation volumes, shorter visibility distances may result. In extreme cases, persons trying to evacuate may not be able to see well enough to reach escape doors.

The tenability of the tunnel inside environment depends on factors such as content of combustion products, temperature and humidity. As a consequence, it is essential to consider the tenability implications of FFFS use when designing or activating these systems. Research has demonstrated that a FFFS reduces the air temperature. However, if the combustion process overwhelms the cooling effect of the FFFS, due to the water phase change, the effect may be a substantial negative impact on environmental tenability. In countries such as Japan and Australia, this is the reason rapid deployment of FFFS is recommended (in order to ensure that fire size is minimized).

This seems to be opposite to the general rule followed by fire-fighters, which is “rescue people from a room first and then extinguish the fire”. This principle also appears in previous PIARC publications (e.g. see [2]).



Figure 2 - Smoke stratification with transverse ventilation [11]

The likelihood that the fire will grow to its maximum possible size is decreased when a FFFS is used appropriately. This could result in achieving the same required level of safety by allowing more flexibility in design.

A FFFS decreases the temperature of smoke, and consequently diminishes the volume of the air/smoke mixture in the tunnel or extraction duct. This effect is favourable to improve conditions for evacuation.



► 5.2. INCIDENCE DE L'ÉCHELLE DE TEMPS SUR L'INTERACTION AVEC LA VENTILATION

Pendant la phase de sauvetage, et plus particulièrement avant la phase de sauvetage assisté, le facteur le plus important est le temps ainsi que la façon dont les facteurs critiques ci-dessous changent ou évoluent en fonction du temps :

- le développement progressif du feu, jusqu'à ce qu'il atteigne son ampleur maximale,
- des conditions de ténabilité en tous les points du tunnel (aussi bien longitudinalement que verticalement par rapport au feu),
- le mouvement des occupants en direction des issues de secours.

La compréhension de ces changements spatiaux et temporels est fondamentale dans l'analyse de l'interaction entre le SFLI et le système de ventilation du tunnel. Cependant, il existe peu de données fondées sur l'expérience. C'est pourquoi de nombreuses personnes pensent que des essais d'incendie réel devraient être effectués.

L'une des méthodes classiques de représentation de l'interaction entre les éléments critiques indiqués ci-dessous est un diagramme bidimensionnel, dont un exemple est présenté à la [figure 3, page suivante](#). Les diagrammes bidimensionnels, qui sont utilisés dans le cadre de l'évaluation des risques, montrent graphiquement ce qui suit :

- le développement du feu, y compris l'évolution des teneurs en produits dangereux, des températures, etc.,
- les conditions de ténabilité, à savoir la visibilité, la température, les niveaux de CO, etc.,
- le processus d'évacuation,
- la stratégie de ventilation en termes de mouvement de l'air.

Le plus difficile, dans cette approche, est de choisir les hypothèses pour les modèles ou les essais et d'éviter un ensemble de scénarios trop compliqué ou irréalisable. Si ces difficultés sont surmontées, ce type d'outil peut permettre de mieux comprendre l'interaction entre un SFLI et le système de ventilation d'un tunnel.

► 5.2. TIME SCALE INFLUENCE ON INTERACTION WITH VENTILATION

During the rescue phase, and especially before the assisted rescue phase, the most important factor is the element of time and how the critical factors below change or evolve as a function of time:

- the progressive growth of the fire until it attains its maximum magnitude,
- the tenability conditions at all points in the tunnel (in longitudinal as well as vertical directions from the fire),
- the movement of occupants towards the escape routes.

Understanding these spatial and temporal changes is of critical importance in analyzing the interaction between a FFFS and the tunnel ventilation system. However, there is very little experience-based information available. As a result, many people feel that actual fire tests should be performed.

A classical method for representing the interaction between the critical elements listed above is a bi-dimensional diagram, an example of which is shown in [Figure 3, next page](#). Bi-dimensional diagrams, which are used as part of risk assessment methodologies, graphically demonstrate the following:

- the growth of the fire, including changing contaminant levels, temperatures, etc.,
- the tenability conditions, represented by visibility, temperature, CO levels, etc.,
- the evacuation process,
- the ventilation strategy, represented by the movement of air.

The greatest difficulties associated with this approach are selecting the hypotheses to be adopted in the models or in the test, and avoiding an unwieldy or impractical matrix of scenarios. If these difficulties can be overcome, then this type of tool has the potential to provide a better understanding of the interaction between a FFFS and a tunnel ventilation system.

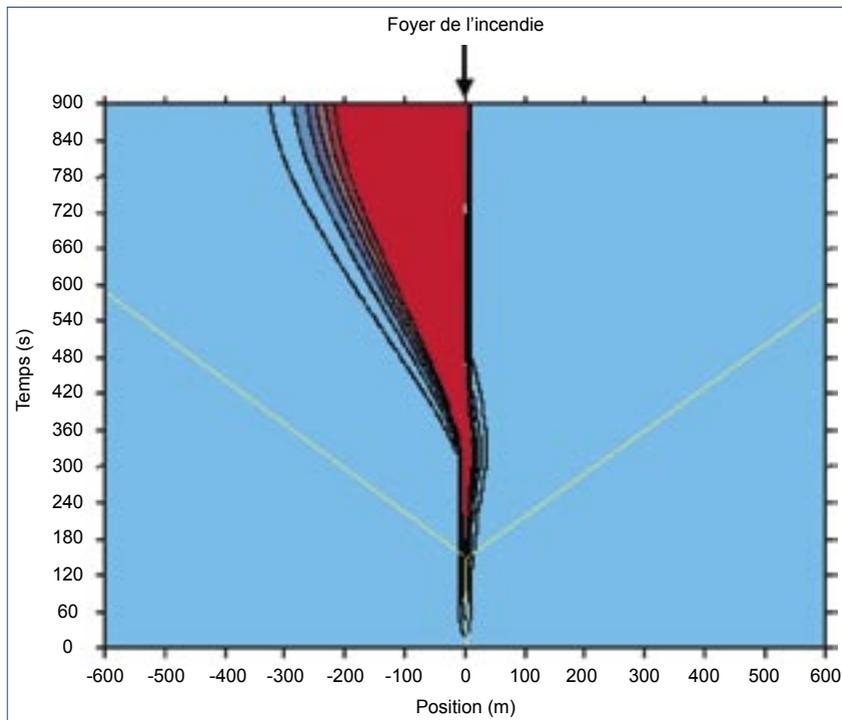


Figure 3. Exemple de schéma illustrant les conditions de ténabilité [11]

► 5.3. PRINCIPALES CONCLUSIONS SUR L'INTERACTION AVEC LA VENTILATION

Le domaine des SFLI étant sans cesse en cours de développement et d'innovation, il est très difficile de fixer des critères généraux ou de formuler des recommandations qui permettent d'améliorer le niveau de sécurité global tout en ne perturbant pas les « meilleures conditions possibles » fournies par le système de ventilation. Les risques spécifiques doivent être évalués dans les conditions spécifiques de chaque projet, au moyen d'une analyse des risques, d'une approche fondée sur des scénarios ou d'autres techniques adaptées aux caractéristiques particulières du tunnel et du SFLI choisi.

Toutefois, quelques observations générales concernant l'interaction entre les SFLI et les systèmes de ventilation peuvent être formulées pour quelques scénarios clés.

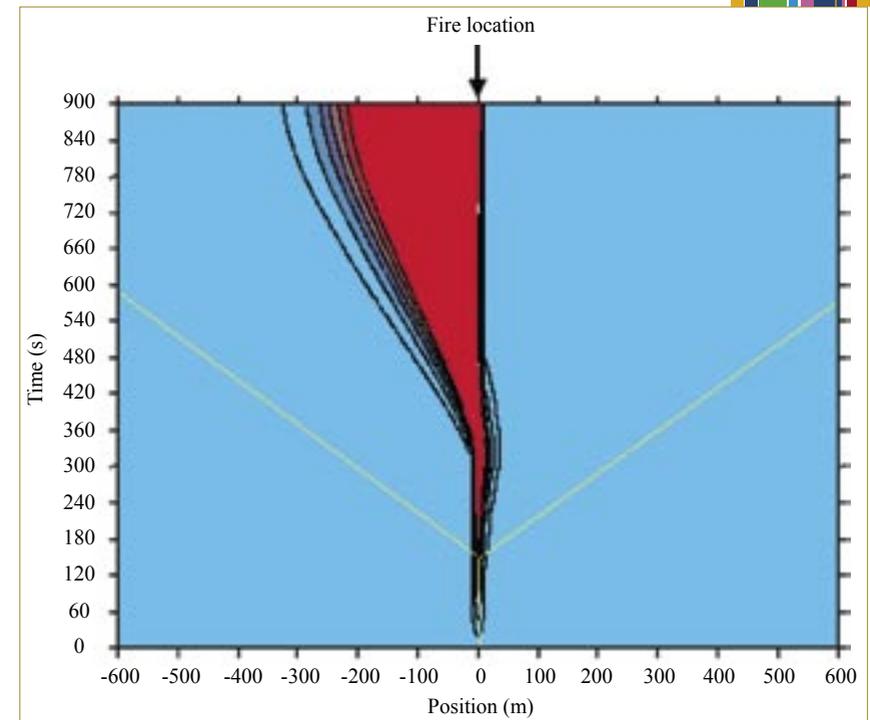


Figure 3 - Example of a tenability condition diagram [11]

► 5.3. PRIMARY FINDINGS ON INTERACTION WITH VENTILATION

Continuous development and innovation in the field of FFFS makes it extremely difficult to give general criteria or recommendations for improving the global safety level, yet not disturbing the “best possible conditions” provided by the ventilation system. Specific risks must be evaluated on a project-specific basis using risk analysis, a scenario-based approach or other techniques adapted to the particular characteristics of the tunnel and of the FFFS alternative selected.

However, some general observations concerning the interaction between FFFS and ventilation systems can be made for a few key scenarios.



5.3.1 Tunnel unidirectionnel, non congestionné, avec une ventilation longitudinale adéquate

- Sans activation du SFLI :
 - conditions en aval : elles devraient devenir rapidement intolérables,
 - conditions en amont : elles devraient être sûres.
- Avec activation du SFLI (considérant que la taille du feu ne dépasse pas celle pour laquelle le SFLI a été conçu) :
 - conditions en aval : la puissance thermique et les températures de l'air devraient diminuer et l'humidité devrait augmenter. La visibilité et la ténabilité ne sont pas garanties – dans certains essais, le SFLI a réduit la ténabilité ;
 - conditions en amont : elles devraient être plus sûres que sans SFLI, car le SFLI peut empêcher le départ d'autres incendies dans le voisinage direct du feu initial. Les effets sur la phase d'auto-sauvetage doivent aussi être évalués pour des scénarios où la zone d'activation n'est pas bien choisie, entraînant une éventuelle activation du système sur le chemin d'auto-évacuation.

Dans les tunnels ventilés de façon longitudinale, les objectifs du SFLI durant l'évacuation sont, le plus souvent, de limiter l'étendue du feu ainsi que sa vitesse de développement et de maintenir des conditions tolérables pour les personnes qui quittent le tunnel ainsi que pour les sauveteurs qui y pénètrent. En plus de maîtriser la propagation du feu jusqu'à ce que les services d'urgence arrivent, le SFLI offre des avantages comme une augmentation de la résistance de l'infrastructure au feu, une limitation des dommages dus au feu et une réduction du temps nécessaire pour les réparations. Quoi qu'il en soit, une activation du SFLI inappropriée ou mal synchronisée peut avoir des conséquences défavorables. Comme pour toute technologie (notamment un système de ventilation), une analyse technique doit être réalisée pour déterminer où un SFLI doit être installé et quand il doit être activé, afin d'éviter toute conséquence défavorable.

5.3.2 Tunnel bidirectionnel ou tunnel unidirectionnel congestionné avec ventilation longitudinale

- Sans activation du SFLI : dans des conditions de ventilation optimales (qui ne sont pas faciles à créer ni à maintenir), des conditions d'évacuation sûres peuvent être obtenues pour une courte période de temps.
- Avec activation du SFLI : le SFLI peut accroître le niveau de sécurité mais il peut également, dans d'autres circonstances, mettre en danger les usagers de la route. Le résultat dépend de l'endroit où se trouvent les personnes par rapport au feu, de la taille du feu, du développement et de la propagation de la fumée au moment où le SFLI est activé. D'importantes recherches, notamment des essais d'incendie, doivent être réalisées pour mettre en

5.3.1 Unidirectional, non-congested tunnel with adequate longitudinal ventilation

- Without FFFS activation:
 - downwind conditions: expected to become rapidly untenable,
 - upwind conditions: expected to be safe.
- With FFFS activation (assuming fire size does not exceed FFFS design fire size):
 - downwind conditions: the heat release rate and air temperatures are expected to decrease and the humidity is expected to increase. Visibility and tenability are questionable -- in some tests FFFS worsened the tenability;
 - upwind conditions: safer than without FFFS because FFFS can prevent other fires from starting in the direct vicinity of the initial fire. The effects on the self rescue phase must also be evaluated for scenarios where the discharge zone is incorrectly selected thus potentially causing system discharge in the self rescue route.

In longitudinally ventilated tunnels, the most common objectives of the FFFS during the evacuation phase are to limit the extent of the fire and the rate of its growth, and to maintain tenability for people who are retreating and emergency service personnel who are advancing. In addition to controlling the spread of fire until emergency services arrive, FFFS offers benefits such as increasing the fire resistance of the infrastructure, limiting the extent of fire damage, and reducing the time necessary for repairs. However, inappropriate or poorly timed activation of the FFFS can result in undesirable consequences. As with any technology (e.g. a ventilation system), an engineering analysis should be performed to determine where a FFFS should be installed and when it should be activated to avoid such undesirable consequences.

5.3.2 Bi-directional or congested unidirectional tunnel with longitudinal ventilation

- Without FFFS activation: Under optimum ventilation conditions (which are not easy to establish and maintain), safe evacuation conditions may be achievable for a short period of time.
- With FFFS activation: The FFFS can increase the level of safety, but can also endanger road users in other cases. The outcome depends on the location of the people with respect to the location of the fire, the fire size, and smoke development/spread at the moment the FFFS is switched on. A significant amount of research, including fire tests, must be performed to pinpoint these parameters and to achieve a more global evaluation of the safety systems.



évidence ces paramètres et obtenir une évaluation plus globale des systèmes de sécurité.

5.3.3 Tunnel unidirectionnel ou bidirectionnel avec ventilation transversale

- Sans activation du SFLI : des conditions d'évacuation sûres peuvent être obtenues pendant une période de temps courte à moyenne si le feu est localisé précisément et si la stratégie de ventilation est bien choisie. Cependant, la quantité de fumée générée par un très gros incendie peut dépasser la capacité d'extraction du système de ventilation. Dans ce cas, le système de ventilation à lui seul ne peut pas gérer la fumée.
- Avec activation du SFLI : le SFLI (s'il est activé au bon endroit) devrait être en mesure de maintenir l'ampleur du feu en dessous de la valeur de conception. Cependant, il faut vérifier si l'activation du SFLI n'aggraverait pas les conditions du tunnel durant la phase d'auto-sauvetage en entraînant une déstratification de la fumée.

Dans tous les cas, une analyse des risques est nécessaire lorsqu'un SFLI doit être incorporé dans un tunnel quel que soit le type de système de ventilation. Les scénarios décrits ci-dessus sont résumés dans le *tableau 1*.

Tableau 1 - Avantages et inconvénients du SFLI dans différents scénarios

SCÉNARIO	INCIDENCE SUR LES CONDITIONS AMBIANTES DURANT L'AUTO-SAUVETAGE		CRÉATION DE RISQUES SUPPLÉMENTAIRES (b)
	STABILISATION (a)	AMÉLIORATION	
Ventilation longitudinale, circulation unidirectionnelle, non congestionnée	Oui	Non	Non
Ventilation longitudinale, circulation bidirectionnelle ou circulation unidirectionnelle congestionnée	Oui	Dépend de la situation spécifique	Oui
Ventilation transversale	Oui	Dépend de la situation spécifique	Oui (c)

- (a) En limitant par exemple la vitesse de développement de l'incendie et la puissance thermique
 (b) En raison, par exemple, d'une erreur de localisation, d'une déstratification
 (c) Pour un tunnel unidirectionnel également

Indépendamment du type de système de ventilation, si le SFLI est correctement conçu et installé, bien intégré avec les autres équipements de sécurité du tunnel et mis en œuvre conformément aux procédures de sauvetage, les conditions du tunnel durant la phase d'évacuation peuvent être stabilisées et les conditions durant la phase d'extinction peuvent être améliorées.

5.3.3 Unidirectional or bi-directional tunnel with transverse ventilation

- Without FFFS activation: Safe evacuation conditions may be achievable for a short to average period of time if the location of the fire is accurately identified and the ventilation strategy is properly selected. However, the amount of smoke generated by a very large fire may exceed the design extraction rate of the ventilation system. In this case, the ventilation system alone may not be able to handle the smoke.
- With FFFS activation: The FFFS (if activated in the right location) should be able to keep the magnitude of the fire below the design value. However, it must be verified that FFFS activation will not worsen tunnel conditions during the self rescue phase by causing smoke to de-stratify, which would be the case if the discharge zone is not properly selected.

In any case, a risk analysis is necessary when a FFFS is to be incorporated into a tunnel with any type of ventilation system. The scenarios described above are summarized in *Table 1*.

Table 1 - Advantages and disadvantages of FFFS within different scenarios

SCENARIO	INFLUENCE ON AMBIENT CONDITIONS DURING SELF-RESCUE		CREATION OF ADDITIONAL RISKS (b)
	STABILIZATION (a)	IMPROVEMENT	
Longitudinal ventilation, unidirectional traffic, non-congested	Yes	No	No
Longitudinal ventilation, bi-directional or congested unidirectional traffic	Yes	depends on the specific situation	Yes
Transverse ventilation	Yes	depends on the specific situation	Yes (c)

- (a) by limiting e. g. fire growth and heat release rate
 (b) by e. g. location error, destratification
 (c) also for unidirectional tunnel

Regardless of the ventilation system type, if the FFFS is properly designed and installed, well-integrated with the other safety equipment in the tunnel, and managed in accordance with established rescue procedures, tunnel conditions during the evacuation phase can be stabilized and conditions during the extinction phase can be improved.