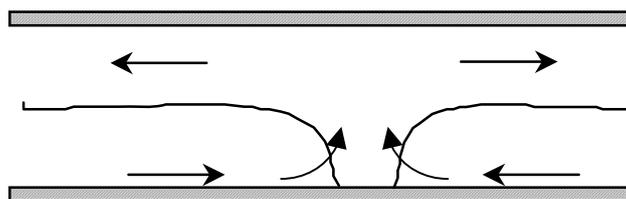


# 1 PRINCIPES DE BASE DE LA PROGRESSION DES FUMÉES ET DE LA CHALEUR AU DÉBUT D'UN INCENDIE

## 1.1 Introduction

Comprendre comment les fumées se comportent au cours d'un incendie en tunnel est essentiel pour tout ce qui concerne la conception et l'exploitation d'un tunnel. Cette compréhension aura une influence sur le type et le dimensionnement du système de ventilation qui sera installé, son exploitation en cas d'urgence et les procédures d'intervention qui seront développées pour permettre aux exploitants et aux services de secours de gérer l'incident de façon sûre. Le présent chapitre explique de façon détaillée le comportement général des fumées et les influences majeures qui affectent leur propagation le long du tunnel.

En l'absence de toute autre influence, les fumées sont gouvernées par leurs propriétés de flottabilité et remontent vers le plafond du tunnel, puis se propagent le long de celui-ci en s'éloignant du foyer sous forme d'une couche stratifiée (voir Figure 1.1). La vitesse de propagation est influencée dans une certaine mesure par l'importance de l'incendie, mais, dans un incendie grave, elle sera de l'ordre de 2 m/s. Les fumées se propageant le long du plafond transmettent de la chaleur à celui-ci, aux parois et à l'air environnant. La couche de fumée plus froide devient alors plus dense. Ce comportement idéalisé n'est pas susceptible de se produire dans un tunnel réel, puisque le mouvement du trafic, la ventilation et/ou les effets météorologiques créent une vitesse longitudinale de l'air.



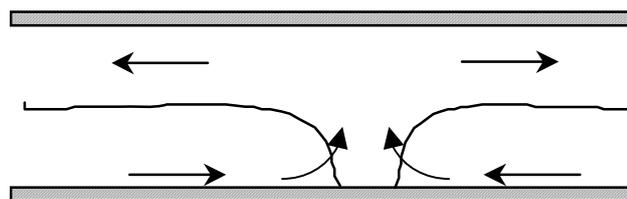
**Figure 1.1 - Progression des fumées dans un tunnel horizontal avec vitesse de l'air nulle dans la zone du foyer**

# 1 BASIC PRINCIPLES OF SMOKE AND HEAT PROGRESS AT THE BEGINNING OF A FIRE

## 1.1 Introduction

An understanding of how smoke behaves during a tunnel fire is essential for every aspect of tunnel design and operation. This understanding will influence the type and sizing of ventilation system to be installed, its operation in an emergency and the response procedures that will be developed to allow operators and emergency services to safely manage the incident. This section presents details of the general behaviour of smoke and the major influences that affect its propagation in a tunnel.

In the absence of any other influences, smoke will be dominated by its buoyant properties and will rise to the tunnel roof or ceiling, and then propagate along the tunnel away from the fire in a stratified layer (see Figure 1.1). The velocity of propagation will be influenced to some extent by the fire size, but in a serious fire will be of the order of 2 m/s. As the smoke propagates along the tunnel roof, it transfers heat to the ceiling, walls and surrounding air. As this occurs, the cooler smoke layer becomes deeper. This idealised behaviour is unlikely to occur in an actual tunnel since traffic movement, ventilation and/or meteorological effects create longitudinal air velocities.



**Figure 1.1 - Smoke progress in a flat tunnel with no air velocity in the fire zone**

## 1.2 Influence de la vitesse longitudinale de l'air

Il est bien connu qu'une remontée stratifiée des fumées en sens contraire du courant d'air (backlayering) se produit lorsque la vitesse longitudinale est inférieure à une valeur appelée « vitesse critique » [4 ; 5]. En revanche, les conditions nécessaires pour maintenir la stratification d'une couche de fumée en aval du foyer sont mal connues.

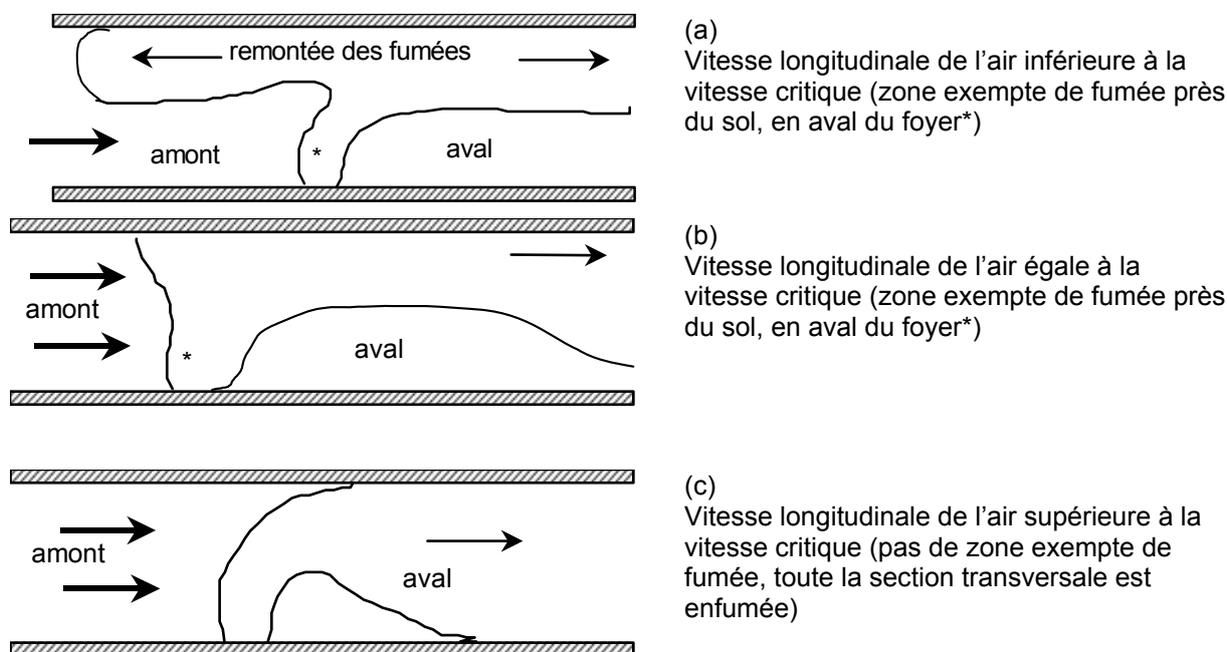


Figure 1.2 - Influence de la vitesse longitudinale de l'air sur la propagation des fumées dans la zone du foyer

Si la vitesse longitudinale de l'air est faible (par exemple  $< 1\text{m/s}$ ) avant que le feu commence, les fumées se propagent d'une façon similaire à celle montrée dans la Figure 1.2a. Cela présente deux avantages importants :

- Il existe une zone exempte de fumée sous la couche de fumée stratifiée, permettant aux usagers de s'échapper.
- La propagation est lente, les usagers du tunnel disposent donc de plus de temps pour s'échapper.

De la même façon que le comportement idéalisé montré dans la Figure 1.1, les fumées se propagent de façon presque symétrique de chaque côté du foyer. Elles restent stratifiées jusqu'à ce qu'elles soient refroidies sous les effets combinés de l'échange thermique par convection avec les parois et du mélange entre les couches de fumée et d'air frais.

Si la vitesse longitudinale de l'air est inférieure à la vitesse critique, les fumées remontent en amont du foyer. Dans ce cas, et à condition qu'il ne se produise aucune perturbation aérodynamique (par exemple celle provoquée par le démarrage d'un accélérateur dans la zone enfumée), la couche de fumée en amont de l'incendie reste stratifiée.

## 1.2 Influence of Longitudinal Air Velocity

It is generally accepted that backlayering upstream of the fire appears when the longitudinal velocity is less than a value called the 'critical velocity' [4; 5]. On the other hand, the conditions needed to maintain the stratification of a smoke layer downstream of a fire are poorly understood.

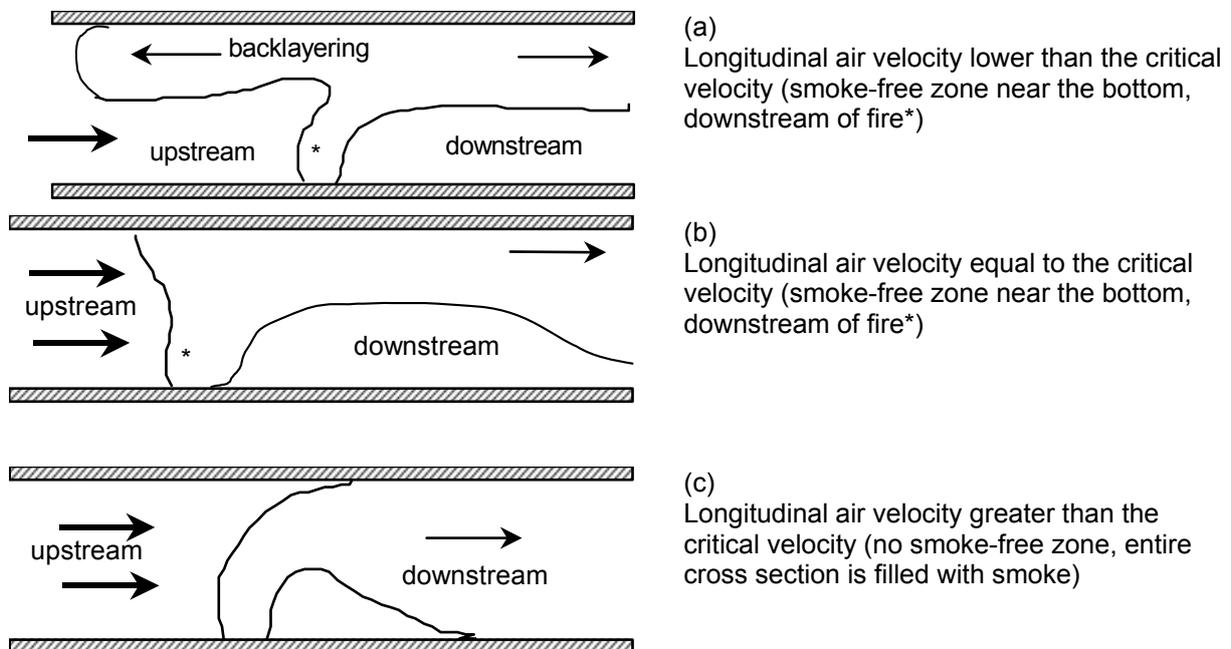


Figure 1.2 - Influence of longitudinal air velocity on smoke progress in the fire zone

If the longitudinal air velocity in the tunnel is low (say  $<1\text{m/s}$ ) before the fire starts, then the smoke will propagate in a manner similar to that shown in Figure 1.2a. This has two important advantages:

- there is a smoke-free zone under the stratified smoke layer, allowing the tunnel user to escape;
- smoke propagation is slow, so tunnel users have more time to escape.

Similar to the idealised behaviour shown in Figure 1.1, the smoke progresses in a nearly symmetrical way on either side of the fire. It remains stratified until it cools down due to the combined effects of the convective heat exchange with the walls and the mixing between the smoke and the fresh air layers.

If the longitudinal air velocity is lower than the critical velocity, the smoke progresses upstream of the fire. In this case, and under the restriction that no aerodynamic perturbation occurs (for instance, that caused by the start up of a jet fan within the smoke zone), the smoke layer upstream of the fire remains stratified.

Pour des vitesses de l'air inférieures ou égales à la vitesse critique, les fumées peuvent, en fonction de la puissance thermique de l'incendie, rester stratifiées en aval du foyer (voir Figures 1.2b et 1.2c). Si la vitesse longitudinale de l'air est supérieure à la vitesse critique, le risque de déstratification en aval de l'incendie se trouve augmenté (voir Figure 1.2c).

La « vitesse de déstratification » au-dessus de laquelle les fumées en aval d'un incendie se déstratifient est difficile à définir. Par contraste avec la remontée des fumées en amont du foyer, la stratification en aval est plus complexe en raison de la nature plus turbulente du flux, et donc du mélange plus intense entre la couche de fumée et la couche d'air frais. Des recherches sont encore nécessaires pour mieux comprendre les conditions qui maintiennent la stratification des fumées pour différentes vitesses et pour connaître les relations qui lient la puissance de l'incendie, la vitesse de l'air, la température de l'air et la stratification des fumées.

### **1.3 Influence de la puissance thermique**

Le débit de fumée produit par l'incendie est à peu près proportionnel à sa puissance thermique. Le panache entraîne l'air frais à partir de la partie basse du tunnel. Au fur et à mesure que l'incendie se développe, ce panache offre une résistance supplémentaire au courant d'air longitudinal.

### **1.4 Influence de la pente du tunnel (déclivité de la chaussée)**

La pente du tunnel produit une accélération de la propagation des fumées dans le sens ascendant (en raison de la flottabilité). Cet effet de cheminée est fonction de la température des fumées et de la déclivité de la chaussée ; un incendie entièrement développé sur une forte déclivité peut avoir pour résultat des vitesses longitudinales élevées et peu ou pas de fumée sur le côté aval du foyer. Combiné à certaines propriétés géométriques du tunnel, cela peut avoir pour conséquence un envahissement total de la section transversale du tunnel par les fumées.

### **1.5 Influence du trafic**

Au cours des minutes qui suivent le départ d'un incendie, les conditions de circulation dans le tunnel se trouvent modifiées. Tout d'abord, l'incendie crée un obstacle pour le trafic, et les voitures qui roulent dans sa direction doivent s'arrêter. Ces véhicules immobiles créent une résistance supplémentaire au courant d'air longitudinal. En second lieu, des barrières ou des feux de circulation sont mis en œuvre aux entrées pour empêcher tout trafic supplémentaire de pénétrer dans le tunnel. Les voitures qui se trouvent après le foyer peuvent normalement sortir du tunnel sans difficulté, augmentant ainsi le pistonnement dans la section aval du tunnel. Ces modifications du trafic, combinées entre elles, affectent la résistance totale au courant d'air dans le tunnel.

For air velocities lower than or equal to the critical velocity, the smoke can, depending on the fire heat release rate, remain stratified downstream of the fire (see Figures 1.2b and 1.2c). If the longitudinal air velocity is greater than the critical velocity, the risk of de-stratification downstream of the fire is increased (see Figure 1.2c).

The “destratification velocity” above which the smoke downstream of a fire will destratify is difficult to define. In contrast to the backlayering upstream of the fire, the stratification downstream of the fire is more complex due to the more turbulent nature of the flow, and thus the enhanced mixing between the smoke layer and the fresh air layer. Research work is still required to better understand the conditions that will maintain smoke stratification for various velocities and to gain knowledge of the relationships between fire size, air velocity, air temperature and smoke stratification.

### **1.3 Influence of the Fire Heat Release Rate**

The smoke flow produced by the fire is roughly proportional to its heat release rate. The fire plume entrains fresh air from the lower part of the tunnel. As the fire develops, the fire plume becomes an additional resistance to the longitudinal airflow.

### **1.4 Influence of the Tunnel Slope (Roadway Grade)**

The tunnel slope causes an acceleration of the smoke propagation in the ascending direction (due to buoyancy). This chimney effect is a function of smoke temperature and roadway grade; a fully developed fire on a steep grade can result in high longitudinal velocities and little or no smoke on the descending side of the fire. Combined with certain geometric tunnel properties, this could lead to the whole tunnel cross section becoming filled with smoke.

### **1.5 Influence of the Traffic**

During the minutes following the start of the fire, the traffic patterns in the tunnel are modified. First, the fire creates an obstacle to the traffic, and cars that are driving toward the fire have to stop. These stopped vehicles create an additional resistance to longitudinal airflow. Secondly, barriers or portal lights will be utilised to stop additional traffic from entering the tunnel. Cars that are past the fire incident can normally exit the tunnel without difficulty, increasing the piston effect in the downstream section of tunnel. These traffic changes, in combination, will affect the overall resistance to airflow in the incident tunnel.

## **1.6 Rôle du système de ventilation pendant la phase d'auto-évacuation**

Le chapitre 4 décrit les caractéristiques du système de ventilation et de son exploitation. Mais il est bon de mentionner ici quels sont les objectifs d'un système de ventilation pendant un incendie, sans trop entrer dans le détail de la façon dont ils sont atteints.

Pendant la phase d'auto-évacuation (pendant laquelle les usagers devraient, de leur propre initiative, tenter de sortir du tunnel), le système de ventilation a pour but de créer et de maintenir un environnement supportable pour l'évacuation des usagers. De façon plus spécifique, cet environnement doit offrir et des niveaux de visibilité et de qualité de l'air acceptables.

## **1.7 Rôle du système de ventilation pendant la phase de déclenchement de l'incendie**

Pendant la phase de déclenchement de l'incendie, l'utilisation du système de ventilation doit être décidée par le commandant des opérations de secours qui choisira la meilleure solution tenant compte des possibilités du système de ventilation et des besoins opérationnels des pompiers.

## **1.6 Role of the Ventilation System during the Self-Evacuation Phase**

The characteristics of the ventilation system and its operation are described in Section 4. However, it is appropriate to mention here the objectives of the ventilation system during a fire, without getting into too much detail on how they are achieved.

During the self-evacuation phase (also called the self-rescue phase, during which tunnels users would, of their own volition, attempt to evacuate from the tunnel), the ventilation system aims to create and maintain a tenable environment for the evacuation of tunnel users. Specifically, this environment consists of acceptable visibility and air quality levels.

## **1.7 Role of the Ventilation System during the Fire-Fighting Phase**

During the fire-fighting phase, the ventilation system operation has to be decided by the head of emergency operations, who should choose the best solution taking into account the possibilities of the ventilation system and the operational needs of the firemen.