



### 3. PRINCIPES GÉNÉRAUX

#### ▶ 3.1. OBJECTIFS EN MATIÈRE DE SÉCURITÉ

Une première étape consiste à définir les objectifs de la sécurité des tunnels routiers. De grands progrès ont été accomplis grâce au travail international de l'AIPCR (p. ex. rapport Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers, en 1999), la CEE-ONU (rapport du groupe d'experts sur la sécurité des tunnels routiers, en 2001) et l'Union européenne (Directive concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels du réseau routier transeuropéen [5]). Ces travaux concordent sur la définition d'un ensemble d'objectifs :

1. Prévenir les événements critiques susceptibles de mettre en danger la vie humaine, l'environnement et les installations des tunnels
2. Réduire les conséquences des accidents, tels que les incendies, en réunissant les conditions préalables permettant :
  - aux personnes impliquées dans l'incident de se sauver ;
  - aux usagers de la route d'intervenir immédiatement pour prévenir des conséquences plus graves ;
  - de garantir une action efficace de la part des services de secours ;
  - de protéger l'environnement ;
  - de limiter les dégâts matériels.

#### ▶ 3.2. LE CERCLE DE LA SÉCURITÉ

La sécurité intégrée des tunnels peut être représentée comme un 'cercle de la sécurité' (voir *Figure 2*). Il peut être inefficace de se concentrer sur l'amélioration de la performance de sécurité d'un seul des éléments de cette séquence si on ne tient pas compte de la performance de sécurité des autres éléments.

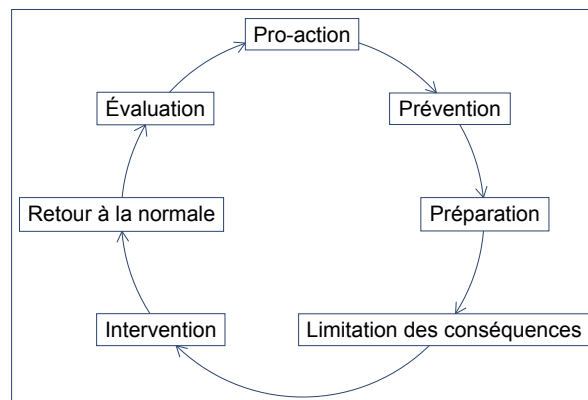


Figure 2 - Le cercle de la sécurité

### 3. GENERAL PRINCIPLES

#### ▶ 3.1. SAFETY OBJECTIVES

A first step is to define the objectives for road tunnel safety. Major progress was achieved due to the international work of PIARC (e.g. report on fire and smoke control in road tunnels of 1999), UNECE (report of the group of experts on road tunnel safety of 2001) and European Union (Directive on Minimum Safety Requirements for Tunnels in the Trans-European Road Network [5]). These works agree on the definition of a set of objectives:

1. Prevent critical events that may endanger human life, the environment and tunnel installations
2. Reduce the consequences of accidents, such as fires by creating the prerequisites for:
  - people involved in the incident to rescue themselves;
  - road users to intervene immediately to prevent greater consequences;
  - ensuring efficient action by emergency services;
  - protecting the environment; and
  - limiting material damage.

#### ▶ 3.2. THE SAFETY CIRCLE

Integrated safety for tunnels can be presented as a 'safety circle' (see *Figure 2*). It can be inefficient to focus on improving the safety performance of only one element in the sequence, without considering the safety performance of the other elements.

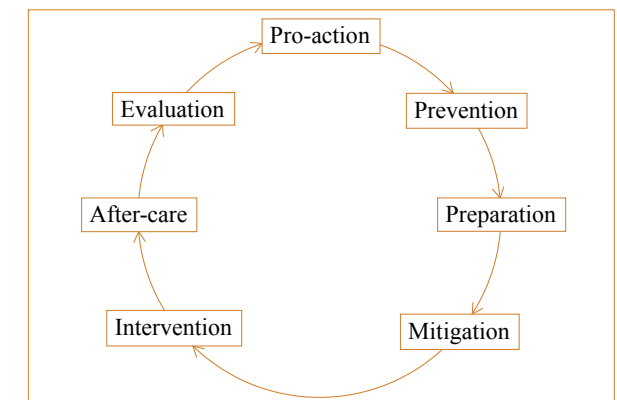


Figure 2 - The safety circle



Le cercle de la sécurité se compose des éléments séquentiels suivants :

1. **Pro-action** : éviter les situations peu sûres dans un tunnel en éliminant toutes les causes à la racine. Cela inclut les caractéristiques de sécurité structurelles et opérationnelles au cours de la phase de planification avant la construction de nouveaux tunnels, la remise en état des tunnels en service, l'éducation des usagers de la route, l'utilisation de véhicules présentant de faibles risques d'incendie, etc.
2. **Prévention** : réduire la probabilité qu'un accident ne survienne dans un tunnel ;
3. **Préparation** : être prêt en cas d'urgence (notamment préparer des plans d'intervention d'urgence et former le personnel chargé des secours) ;
4. **Limitation des conséquences** : réduire autant que possible les conséquences d'un accident survenu dans un tunnel<sup>1</sup> ;
5. **Intervention** : s'assurer qu'un soutien approprié sera fourni par les équipes de secours en cas de conséquences graves suite à un accident ;
6. **Retour à la normale** : faire tout ce qui est nécessaire pour revenir à la 'normale' (par ex. assistance aux victimes et réparation des dommages).
7. **Évaluation** : tirer les enseignements des incidents et identifier les améliorations possibles.

Le cercle de la sécurité traduit le fait que l'évaluation des accidents survenus ou des accidents évités de justesse devrait aboutir à une évaluation périodique des éléments de la séquence. Il en va de même pour l'intégration de nouvelles technologies devenues disponibles pour un tunnel particulier.

De manière générale, les caractéristiques de sécurité dont l'effet intervient tôt dans la succession des événements, ont le meilleur rapport coût efficacité. De plus, certains éléments peuvent compenser en partie les effets plus faibles d'autres éléments. Par exemple, si la préparation et l'intervention sont insuffisantes, il se peut qu'une prévention accrue soit nécessaire pour un certain type d'accidents (par exemple le contrôle de la surchauffe des freins des poids lourds à l'entrée de tunnels routiers sur des tracés à fortes pentes longitudinales).

### ► 3.3. LE MODÈLE DU NŒUD PAPILLON

Une autre forme graphique permettant de représenter les aspects clés de la sécurité dans les tunnels est le modèle du « nœud papillon ». Ce modèle incorpore les divers stades d'un accident (voir [Tableau 3](#)). Le plus souvent, les incidents sont déterminés par certaines causes (conditions préalables), en d'autres termes

<sup>1</sup> Cela inclut la prise de mesures en cas d'accident, permettant aux usagers du tunnel de se sauver eux-mêmes (auto sauvetage) avant l'arrivée des équipes de secours.

The safety circle consists of the following sequential elements:

1. Pro-action: avoid unsafe situations in a tunnel by the elimination of all root causes. This includes the structural and operational safety features during the planning phase before construction of new tunnels, refurbishment of in-service tunnels, educating road users, providing fire-safe vehicles, etc.;
2. Prevention: reduce tunnel accident probabilities;
3. Preparation: emergency preparedness (such as the preparation of emergency response plans and training of rescue personnel);
4. Mitigation: mitigate the consequences of a tunnel accident as much as possible<sup>1</sup>;
5. Intervention: make sure that adequate support by rescue teams will be provided in the event of serious consequences from an accident;
6. After-care: do all that is needed to return to 'normal' (e.g. assistance to victims and repair of damage).
7. Evaluation: draw the lessons from incidents and identify possible improvements.

The safety circle expresses the fact that the evaluation of accidents and near misses should lead to a periodic evaluation of the sequential elements. The same is true for incorporating new technologies that become available for a particular tunnel system.

In general, safety features that function early in the sequence of events are the most cost effective. Moreover, some elements can partially compensate for weaker ones. For instance, if preparation and intervention are insufficient, maybe extra prevention measures may need to be taken for a certain accident type (for instance the monitoring of brake overheating of trucks at the entrance of a road tunnel with steep gradients).

### ► 3.3. THE BOW TIE MODEL

Another graphic form to express the key aspects of tunnel safety is the 'bow tie' model. This model incorporates the different stages of an accident ([see Table 3](#)). In most cases incidents are determined by certain causes (pre-conditions), in other words a disruption of the normal course of the traffic. An accident is composed of

<sup>1</sup> This includes taking measures in the event of an accident to enable tunnel users to rescue themselves (self-rescue) before the rescue teams arrive.



une perturbation du cours normal du trafic. Un accident comporte divers stades, à commencer par un incident. Le processus de développement de l'accident détermine la gravité de ses effets. Cela peut s'exprimer graphiquement en considérant l'incident comme le point nodal entre les causes (conditions préalables) et les effets (conséquences). La chaîne causes – incident – effets a la forme d'un nœud papillon (cf. Figure 3).

Tableau 3 - Étapes d'un accident

Stade	Description de l'étape de processus
1. Stade initial	1. Perturbation du cours normal
2. Accident	2. Début de l'accident proprement dit 3. Développement de l'accident 4. Développement de situations peu sûres pour les autres usagers
3. Détection et alerte	5. Détection, alerte, vérification, transmission d'information
4. Auto sauvetage	6. Les usagers quittent le tunnel par leurs propres moyens
5. Intervention d'urgence	7. Assistance des services d'intervention d'urgence 8. Limitation des conséquences par les services d'intervention d'urgence

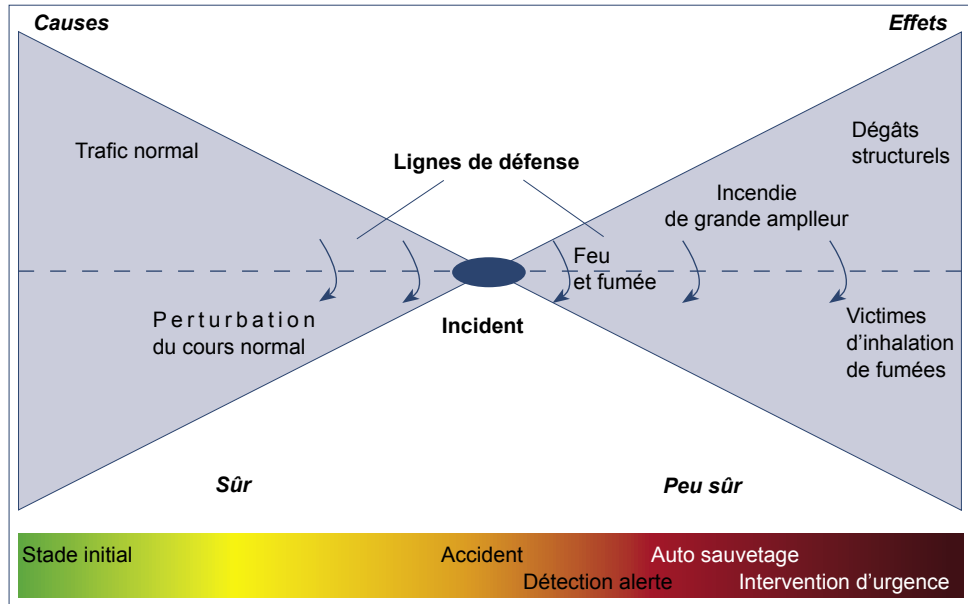


Figure 3 - Le modèle du noeud papillon appliqué aux accidents dans les tunnels impliquant un incendie et de la fumée

different stages. The accident development process determines the seriousness of the consequences. This can be expressed graphically by regarding the incident as a nodal point between the causes (pre-conditions) and the effects (consequences). The chain with causes–incident–effects has the shape of a bow tie (cf. Figure 3).

Table 3 - Stages of an accident

Stage	Process step description
1. Initial Stage	1. Disruption of the normal course
2. Accident	2. The actual start of the accident 3. The accident development 4. The development of unsafe situations for other travelers
3. Detection and warning	5. Detection, warning, verification, reporting information
4. Self rescue	6. Escape from the tunnel by the travelers on their own
5. Emergency response	7. Attendance of the emergency response services 8. Consequence mitigation by the emergency response services

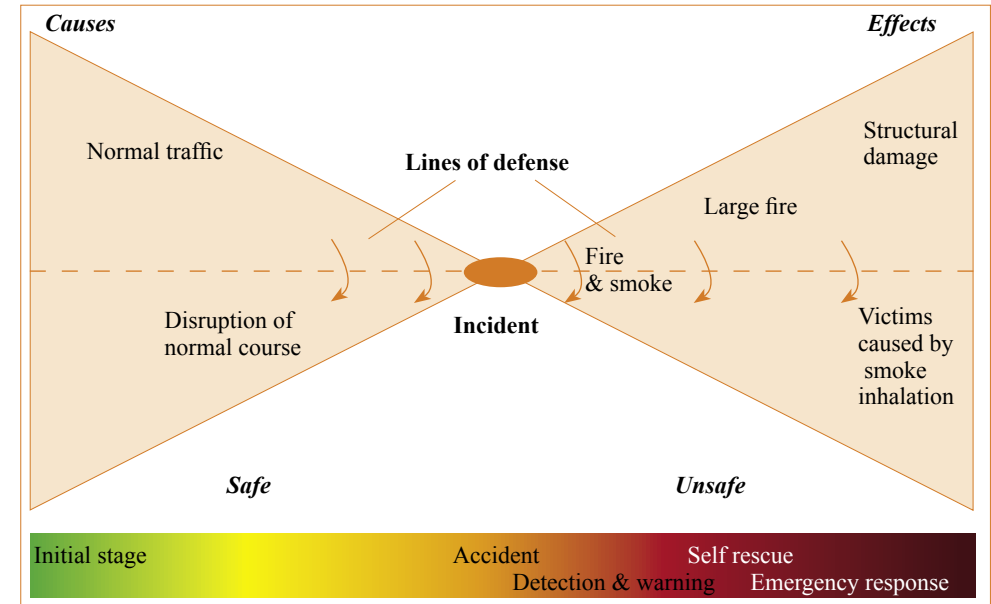


Figure 3 - Bow tie model applied to tunnel accidents with fire and smoke



Les deux parties du nœud papillon contiennent les points d'action permettant d'influencer les événements avant ou après l'incident. D'un côté, une attention devrait être accordée à la prévention des incidents (par exemple surchauffe des freins des poids lourds). De l'autre, l'atténuation (par exemple empêcher un petit incendie de se transformer en incendie de grande ampleur) et la réduction des effets des accidents (tels que la fumée ou les gaz toxiques) sont d'une importance cruciale. La distinction entre Stade initial, Incident, Détection & avertissement, Auto sauvetage et Intervention d'urgence peut être considérée comme une catégorisation plutôt sommaire.

Les flèches représentent ce que l'on appelle les lignes de défense pour rétablir une situation de trafic normale (non perturbée). Les principes de base applicables sont les suivants :

- trouver des solutions aussi tôt que possible dans la séquence des événements ;
- établir des lignes de défense et des points d'action pour les mesures de sécurité.

Un exemple de ligne de défense pourrait être un système de détection de surchauffe des freins des poids lourds (solution intervenant tôt, dans la partie gauche du nœud papillon), ou des systèmes de détection de fumée (solution située dans la partie droite du nœud papillon). Le modèle du nœud papillon illustre une réduction optimale des risques.

Both sides of the bow tie contain the points of action to influence the events before or after the incident. On the one hand, attention should be given to incident prevention (for instance brake overheating of trucks). On the other hand, the mitigation (for instance preventing a small fire growing into a large fire) and reduction of accident effects (such as smoke or toxic gases) is of crucial importance. The subdivision into Initial Stage, Incident, Detection & Warning, Self Rescue and Emergency Response can be considered as a rather rough categorization.

The arrows represent the so-called lines of defence to re-establish the normal (undisturbed) traffic situation. The following basic principles hold:

- Find solutions as early in the sequence of events as possible; and
- Establish lines of defence and points of actions for safety features.

An example of a line of defence could be a system for detecting overheating truck brakes (an early solution at the left-hand side of the bow tie), or a smoke detection systems (a solution at the right-hand side of the bow tie). The bow tie model illustrates an optimal reduction of risk.