



5. ÉLÉMENTS D'UNE APPROCHE INTÉGRÉE

► 5.1. CADRE

Le présent chapitre propose un cadre d'approche intégrée, composé des principaux éléments suivants :

- critères de niveau de sécurité (réglementations et recommandations) ;
- mesures de sécurité relatives à l'infrastructure et à l'exploitation ;
- critères socio-économiques et rapports coût efficacité ;
- techniques d'appréciation de la sécurité (analyse de la sécurité et évaluation de la sécurité) ;
- utilisation des tunnels routiers ;
- phase de la vie du tunnel (planification, conception, construction ; mise en service ; exploitation, rénovation ou remise en état) ;
- expérience en matière d'exploitation ;
- état d système constitué par le tunnel.

La structure de cette approche devrait rendre possible l'appréciation de la sécurité de tous les types de tunnels routiers et devrait faire des distinctions en fonction de leurs caractéristiques spécifiques.

► 5.2. CRITÈRES DE NIVEAU DE SÉCURITÉ

En général, cet élément représente une description en partie générale et en partie spécifique au projet des points de départ relatifs à la conception et à l'exploitation d'un tunnel. Il se compose d'un ou plusieurs des points suivants :

- exigences minimales de sécurité et normes de sécurité ;
- normalisation du processus de sécurité ; méthode de travail impliquant tous les partenaires pertinents en matière de sécurité dans le processus de décisions touchant à la sécurité dans les tunnels ;
- normes de sécurité ou valeurs de référence pour l'analyse de la sécurité. Par exemple, quelques pays ont fixé un risque individuel maximal tolérable de 10-n par kilomètre parcouru et/ou un risque sociétal maximal tolérable de 10-m/Nk (voir par exemple *Figure B.11.1* de l'*Annexe B, page 150*) par an et par kilomètre ou par tunnel, où N est le nombre de victimes directes dues à un accident dans un tunnel et n, k et m peuvent varier selon les pays ;
- normes déterministes ou valeurs de référence pour des scénarios pertinents en conditions d'accidents.

5. ELEMENTS IN AN INTEGRATED APPROACH

► 5.1. FRAMEWORK

This chapter proposes a framework for an integrated approach, which consists of the following principal elements:

- Safety level criteria (regulations and recommendations);
- Infrastructure and operational measures for tunnel safety;
- Socio-economic and cost-benefit criteria;
- Safety assessment techniques (safety analysis and safety evaluation);
- Road tunnel usage;
- Stage of the tunnel life (planning, design, construction; commissioning; operation, refurbishment or upgrading);
- Operating experience;
- Tunnel system condition

The structure of the approach should enable the safety assessment of all types of road tunnels and should differentiate between tunnel-specific characteristics.

► 5.2. SAFETY LEVEL CRITERIA

In general, this element is a partly general and partly project-specific description of the starting points with regard to the design and operation of a tunnel. It consists of one or more of the following items:

- Minimum safety requirements and safety standards;
- Safety process standardisation; a working method to involve all relevant partners when it comes to safety in the tunnel safety decision making process;
- Safety standards or reference values for safety analysis. For instance, a few countries have fixed a maximum tolerable personal risk of 10-n per travelling kilometre and/or a maximum tolerable societal risk of 10-m/Nk (see for instance *Figure B.11.1* in *Appendix B, page 151*) annually per kilometre or per tunnel, where N is the number of direct victims due to a road or rail tunnel accident and n, k and m may vary from country to country;
- Deterministic standards or reference values for relevant scenarios under accident conditions.



► 5.3. CRITÈRES SOCIO-ÉCONOMIQUES ET RAPPORTS COÛT EFFICACITÉ

D'un côté, les mesures de sécurité des tunnels doivent être d'une grande qualité et d'une grande fiabilité, et de l'autre elles doivent avoir un bon rapport coût efficacité. Pour déterminer les mesures de sécurité qui ont un bon rapport coût efficacité, il est nécessaire de tenir compte de toutes les phases de la vie en service d'un tunnel. Certains coûts étant encourus aux stades de la construction et dans les phases d'installation, et d'autres coûts survenant au cours de l'exploitation, il est nécessaire d'utiliser, pour la conception et l'exploitation du tunnel, une approche des coûts étendue sur tout le cycle de vie, afin de trouver les solutions ayant les meilleures rapports coût efficacité.

L'appréciation financière, socio-économique, macro-économique et environnementale de la planification d'un nouveau tunnel ou de la rénovation d'un tunnel en service devrait faire l'objet d'une approche intégrée. La relation entre la mise en œuvre d'un grand projet de tunnel et les changements socio-économiques qui s'ensuivent dans la région environnante devrait également être considérée. Pour déterminer la valeur globale du projet, les méthodes appropriées pour détecter et évaluer ces changements doivent être appliquées.

► 5.4. MESURES DE SÉCURITÉ RELATIVES À L'INFRASTRUCTURE ET À L'EXPLOITATION

Les mesures de sécurité fournissent la performance de sécurité requise pour un tunnel. Ces mesures concernent à la fois l'infrastructure et l'exploitation. Les mesures relatives à « l'infrastructure » recouvrent tous les systèmes et instruments techniques, les solutions géométriques et structurelles, les matériaux choisis pour les composants constituant le tunnel et pour les dispositifs installés (*voir Bergmeister et Francesconi [9]*).

Les mesures de sécurité peuvent être soit descriptives (elles sont aussi appelées « prescriptives », soit performantielles, et devraient être réparties de manière équilibrée sur tout le cercle de la sécurité. Le *tableau 8 (page suivante)* donne des exemples de mesures de sécurité correspondant à certains éléments du cercle de la sécurité ; en outre, certaines mesures ont des incidences bénéfiques sur plusieurs aspects.

Les mesures de sécurité relatives à l'exploitation sont cruciales pour garantir la sécurité de l'usager. Elles incluent les procédures pour une gestion appropriée de la sécurité du tunnel, telles que la répartition des tâches, responsabilités et compétences des diverses parties en matière de sécurité. Cela comprend le contrôle, la maintenance et la gestion du trafic. En outre, les plans et procédures

► 5.3. SOCIO-ECONOMIC AND COST-BENEFIT CRITERIA

Tunnel safety features have on the one hand to be of high quality and very reliable and on the other hand to be cost effective. To determine which safety features are cost-effective, it is necessary to take into account all stages of the tunnel service life. Since some costs occur at the construction and installation stages and other costs occur during operation, it is necessary to use a life cycle cost approach in order to find the most cost-effective solutions for tunnel system design and operation.

The financial, socio-economic, macro-economic and environmental assessment of planning a new tunnel or upgrading an in-service tunnel should be a part of an integrated approach. The relationship between the implementation of a major tunnel project and consequent socio-economic changes in the surrounding region should also be addressed. The proper methods for detecting and evaluating these changes must be applied in order to provide the overall project value.

► 5.4. INFRASTRUCTURE & OPERATIONAL SAFETY FEATURES

Safety features supply the required safety performance to a tunnel system. The safety features include both infrastructure and operational measures. 'Infrastructure' means all the technical systems and instruments, the geometrical and structural solutions, the materials chosen for the components constituting the tunnel and for the installed devices (*see Bergmeister and Francesconi [9]*).

The safety features can be either prescriptive or performance-based and should be distributed in a balanced way over the safety circle. *Table 8 (next page)* gives examples of safety features corresponding to some elements of the safety circle; in addition, some measures have beneficial effects on several aspects.

The operational safety features are crucial to ensure tunnel user safety during operations. They include the procedures for adequate tunnel safety management, such as the distribution of safety duties, responsibilities and authorities of different parties. This comprises inspection, maintenance and traffic management. Besides, existing plans and procedures in case of accidents must be adapted



pour les cas d'accident doivent être adaptés à une nouvelle période d'exploitation qui fait suite à une rénovation et la phase d'essais correspondante. Les résultats du WP6 « Systèmes de gestion de tunnels intégrés » de SafeT [3], décrivent en détail une vision intégrée d'un système de gestion de la sécurité dans les tunnels.

La coordination entre les tâches des exploitants, de l'équipe de maintenance et des équipes de secours doit être bien décrite et testée périodiquement. Enfin, les procédures de rétablissement (retour à la normale) visant à rétablir la situation initiale doivent elles aussi être établies.

Toutes les caractéristiques de sécurité possibles ne sont pas toujours nécessaires ; l'ensemble de mesures infrastructurelles et opérationnelles convenable est celui qui répond aux critères de niveau de sécurité décrits au *chapitre 5.2*.

Tableau 8 - Relation entre le cercle de la sécurité et les mesures de sécurité possibles relatives à l'infrastructure (Voir Bergmeister et Francesconi [9])

Prévention	Limites de vitesse abaissées Interdiction de changer de voie et de dépasser Surface de la chaussée (adhérence) Zones d'éclairage : adaptation, courant et sécurité Revêtements et panneaux muraux Panneaux à messages variables
Atténuation	Détection automatique des incidents Câbles thermosensibles Capteurs de gaz toxiques Éclairage de secours au niveau des marchepieds Alarmes sonores Téléphones de secours Signal pour téléphones cellulaires Haut-parleurs Plan de secours des autorités du tunnel Canaux audio, visuels et tactiles Systèmes de contrôle automatique du trafic Composants résistant aux hautes températures d'incendies et aux explosions Surface de la chaussée (non poreuse) Aires de mise en sûreté Sprinklers Ventilation longitudinale, transversale et semi-transversale Systèmes d'extraction des fumées (cheminées) Systèmes de maintenance de la stratification des fumées Voies de secours / entrées alternatives Aires d'arrêt aux portails des tunnels
Intervention	Hydrantes, extincteurs Véhicules de secours

to a new operation period after an upgrading process and the respective testing phase. The SafeT deliverable WP6 integrated tunnel management systems [3] provides a comprehensive description of an integrated view of a tunnel safety management system.

The co-ordination of the duties of operators, maintenance crew and rescue teams must be well described and tested periodically. Finally, recovery (after-care) procedures to restore the original situation must be established as well.

Not all possible safety features are always needed; the right set of infrastructure and operational measures is the set that fulfils the safety level criteria as described in *Section 5.2*.

Table 8 - Relationship between the safety circle and possible infrastructure safety features for tunnel safety (See Bergmeister and Francesconi [9])

Prevention	Reduced speed limits Prohibited lane changing and overtaking Road surface (friction) Lighting zones: adaptation, current and safety Walls coatings and panels Variable message panels
Mitigation	Automatic incident detection Heat sensitive cables Toxic gases sensors Emergency lighting at kerb level Alarm sounders Emergency telephones Cellular phone signal Loudspeakers Tunnel authorities emergency plan Audio, visual and tactile channels Automatic traffic control systems High temperature fires, explosion-resistant components Road surface (non-porous) Safe havens Sprinklers Longitudinal, transverse and semi-transverse ventilation Smoke extraction systems (chimneys) Smoke stratification maintaining systems Alternative escape/entrance ways Lay-bys at tunnel portals
Intervention	Hydrants, extinguishers Emergency vehicles



► 5.5. APPRÉCIATION DE LA SÉCURITÉ

L'appréciation de la sécurité (analyse et évaluation de la sécurité) répond à la question de savoir si le niveau de sécurité souhaité a été atteint. Dans une approche totalement descriptive, la réponse sera oui et la sécurité sera appréciée automatiquement. Dans de nombreux cas, les performances de sécurité du tunnel devraient être testées, par exemple par une analyse et appréciation de sécurité basée sur des scénarios. A cet effet, plusieurs options sont disponibles selon les pays. On peut choisir une analyse probabiliste, une analyse déterministe ou une combinaison des deux. Par exemple :

- une appréciation probabiliste de la sécurité pourrait être une évaluation quantitative des risques (EQR) destinée à vérifier que les indicateurs de risques sont en-dessous du niveau prescrit par les normes de risques ou les valeurs de référence correspondantes. Des modèles EQR sont disponibles tant pour les risques « internes » concernant les usagers du tunnel que pour les risques « externes » concernant les personnes vivant ou travaillant à proximité du tunnel ;
- une appréciation de la sécurité déterministe pourrait être une analyse de scénarios visant à examiner toutes les possibilités de fuite et de sauvetage pour l'usager du tunnel routier en cas de catastrophe, y compris l'auto sauvetage ainsi que l'aide fournie par les services de secours. En considérant le modèle du nœud papillon présenté à la *figure 3*, l'analyse de scénarios se focalise sur la partie droite du nœud papillon, pour un ensemble soigneusement sélectionné de scénarios d'accidents.

De telles évaluations sont abordées plus en détails dans le rapport de l'AIPCR « Analyse des risques pour les tunnels routiers » [8].

La sûreté (vulnérabilité d'un tunnel envers le vandalisme ou une action terroriste) et la sécurité sociétale (risques pour des personnes se trouvant dans ou à proximité d'un tunnel, causés par d'autres personnes se trouvant dans ou à proximité du tunnel) peuvent aussi faire l'objet d'une analyse de sécurité.

► 5.6. UTILISATION DES TUNNELS ROUTIERS

La plupart des tunnels routiers sont conçus pour un certain débit de trafic et une certaine capacité. Il est recommandé de réévaluer la sécurité dans les cas où un changement est attendu ou s'est déjà produit, par exemple :

- une augmentation importante du trafic est prévue, ou
- les caractéristiques du trafic (pourcentage des véhicules lourds ou des

► 5.5. SAFETY ASSESSMENT

Safety assessment (safety analysis and evaluation) answers the question whether the desired safety level has been reached. In a fully prescriptive approach, the answer will be yes and the safety is assessed automatically. In many cases, the safety performance of the tunnel should be tested, for instance by a scenario-based safety analysis and evaluation. Hitherto, several options are available varying from country to country. Probabilistic analysis, deterministic analysis or a combination of both can be chosen. For instance:

- a Probabilistic Safety Assessment could be a Quantitative Risk Analysis (QRA) to check that risk indicators are below the level prescribed by the corresponding risk standards or reference values. QRA models are available for both the 'internal' safety risks for the tunnel users and the 'external' safety risks for the people living or working close to the tunnel;
- a Deterministic Safety Assessment could be a scenario analysis to examine all escape and rescue possibilities for the road tunnel user in the event of an emergency, including self-rescue as well as aid by the rescue services. Considering the bow tie model presented in *Figure 3*, scenario analysis focuses on the right-hand side of the bow tie for a carefully selected set of accident scenarios.

Such assessments are addressed in more detail in the PIARC report 'Risk Analysis for Road Tunnels' [8].

Security (the vulnerability of a tunnel system to vandalism or terrorist action) and social safety (the risks to people in and near the tunnel caused by other people in or near the tunnel) may also be the subject of safety analysis.

► 5.6. ROAD TUNNEL USAGE

Most road tunnels are designed for a certain traffic flow and capacity. It is recommended that safety is re-assessed when a change is expected or has already occurred, for instance:

- a substantial increase in the traffic flow is to be expected, or
- the traffic characteristics (portion of heavy goods vehicles or dangerous



transports de marchandises dangereuses, vitesse, etc.) changent considérablement,

- lorsque la réglementation relative au transport de marchandises dangereuses à travers un tunnel est modifiée.

► 5.7. PHASE DE LA VIE DU TUNNEL

La phase dans laquelle se trouve un tunnel est un aspect important pour le degré de détail avec lequel il est possible d'effectuer les analyses de sécurité. Dans la phase de planification, plusieurs alternatives peuvent être évaluées selon le niveau de sécurité requis. Au stade de la conception, davantage d'informations sur les choix des caractéristiques de sécurité sont disponibles et une analyse de sécurité plus poussée peut être réalisée.

► 5.8. EXPÉRIENCE EN MATIÈRE D'EXPLOITATION

Une appréciation de la sécurité au stade de la planification ou de la conception repose en partie sur des données statistiques génériques, par exemple sur les incidents ou sur la performance des équipements (de sécurité). Après la mise en service du tunnel, l'expérience en matière d'exploitation sera progressivement accumulée jour après jour. Il faut vérifier périodiquement si certaines des données statistiques génériques devraient être remplacées par des données statistiques propres au tunnel et si une nouvelle appréciation de la sécurité doit être effectuée.

► 5.9. ÉTAT DES TUNNELS

L'état du tunnel détermine la mesure dans laquelle un tunnel routier est à même d'assurer sa fonction, à savoir permettre un trajet sûr à travers le tunnel pour tous les usagers. Le *tableau 9* indique la relation entre l'état d'un tunnel et les actions requises pour garantir la sécurité dans le tunnel.

Tableau 9 - Relation entre l'état d'un tunnel et les actions requises

État d'un tunnel	Actions requises
Tunnel en fonctionnement ou exploitation normale du tunnel	Contrôles périodiques et de maintenance appropriés
Perte de fonctionnement acceptable ou défaillance partielle des installations du tunnel	Mesures complémentaires
Perte de fonctionnement inacceptable	Fermeture du tunnel

goods transports, speed etc.) change substantially, or

- when the regulations for dangerous goods transport through a tunnel are changed.

► 5.7. STAGE OF THE TUNNEL LIFE

The stage of the tunnel life is an important aspect with regard to the level of detail at which safety analysis can be performed. During the planning stage, several alternatives can be assessed against the required level of safety. At the design stage, more information on the choices of the safety features is available and a more refined safety analysis can be performed.

► 5.8. OPERATING EXPERIENCE

A safety assessment at the planning or at the design stage will be partly based on generic statistical data, for instance on incidents or the performance of (safety) equipment. After commissioning the tunnel, operating experience will be gradually gathered from day to day. It has to be checked periodically if some of the generic statistical data should be replaced by tunnel specific statistical data and if a new safety assessment must be carried out.

► 5.9. TUNNEL SYSTEM CONDITION

The condition of the tunnel system determines to what extent a road tunnel system can fulfill its function, i.e. to enable a safe journey through the tunnel for all users. *Table 9* shows the relationship between the condition of a tunnel and the required actions to warrant the tunnel safety.

Table 9 - Relationship between the tunnel condition and the required actions

Condition of a tunnel	Required Actions
Tunnel Function i.e. Normal Operation	Adequate Maintenance & Periodic Inspections
Acceptable Loss of Function i.e. Partial Failure of Tunnel Installations	Complementary Measures
Unacceptable Loss of Function	Closure of the Tunnel



Toutes les mesures de sécurité, telles que les possibilités de fuite, les systèmes de protection incendie et les services de secours, ainsi que les critères de niveau de sécurité correspondants sont liés à ce fonctionnement. La défaillance d'une ou de plusieurs mesures de sécurité entraîne une diminution de la sécurité pour les usagers du tunnel. La défaillance d'une mesure de sécurité particulière signifie une performance inacceptable de cette mesure ; de ce fait, les critères d'acceptation doivent être définis pour chaque mesure de sécurité³. Lorsque cela amène à une modification de l'état du tunnel telle que la sécurité des usagers tombe à un niveau inacceptable, le tunnel doit être fermé. Dans la pratique, le tunnel ne subira pas de défaillance complète tant que des mesures complémentaires temporaires peuvent compenser la défaillance partielle de certains équipements ou installations de sécurité.

All the safety features, such as the means of escape, fire protection systems and the rescue services, and the corresponding safety level criteria are related to this function. Failure of one or more of the safety features reduces the safety of tunnel users. Failure of a particular safety feature means an unacceptable performance of this safety feature; hence, acceptance criteria need to be defined³ for each safety feature. When this leads to a change in the condition of the tunnel system, such that safety decreases to an unacceptable level, the tunnel should be closed. In practice, the complete tunnel system will not fail as long as temporary complementary measures can compensate for the unavailability of certain safety equipment or installations.