

# Analyse de risques lors d'accidents en tunnels

Auteurs : Yves Trottet, David Vernez, Marcel Jufer

## L'essentiel en une page

L'étude intitulée "Analyse de risques lors d'accidents en tunnels" analyse plus de 170 accidents dans des tunnels et, grâce à un outil de simulation, génère des scénarios d'accidents en tunnel.

Quatre conclusions principales peuvent être tirées : d'abord, les possibilités de sauvetage autonome des voyageurs sont d'une importance capitale et doivent être développées. Ensuite, l'information, la communication et la formation des différents acteurs doivent être améliorées. Troisièmement, l'accès au lieu de l'accident doit être possible par un tunnel non affecté par l'accident. Et quatrièmement, une séparation du flux de trafic des personnes et des marchandises est indispensable.

### **Sauvetage autonome décisif**

Bien que les accidents y soient plus rares que ceux qui se produisent sur des voies ouvertes, leurs conséquences, particulièrement en cas d'incendie, sont plus dévastatrices. Lors d'un événement, les dix premières minutes sont décisives pour la survie des voyageurs car, en cas de feu, la fumée envahit très rapidement le tunnel, et ceci bien avant que les équipes de secours ne parviennent sur les lieux de l'accident. Il faut améliorer les possibilités, pour les passagers des trains et des voitures, d'organiser eux-mêmes leur évacuation (sauvetage autonome ou self rescue).

En complément aux extincteurs, aux aires de secours et à une bonne indication du chemin de fuite, l'information à l'entrée du tunnel est également importante. Dans les tunnels, des moyens d'intervention et des appareils de sauvetage sont souvent à disposition, mais les voyageurs ne sont pas ou mal informés de leur utilisation. Ce qui est usuel pour les passagers d'un avion, c'est-à-dire une instruction sur les mesures de sécurité, manque totalement pour les utilisateurs du chemin de fer ou de la route.

### **Communication et formation : faiblesses fréquentes**

Une autre faiblesse révélée par les accidents analysés est la communication entre les différents acteurs (exploitants du tunnel et personnel d'intervention), qui doit également fonctionner dans les conditions difficiles d'un tunnel enfumé.

### **Troisième tube pas indispensable**

Lors de la construction de tunnels, il faut être attentif à ce que les sauveteurs puissent atteindre le lieu d'accident par une voie non affectée par l'accident. Un troisième tube n'est cependant pas indispensable, il suffit d'un deuxième tube, en général utilisé pour le trafic en sens inverse, mais avec des liaisons régulières entre les tunnels.

### **Séparation des flux de trafic**

Une séparation entre le trafic de marchandises et celui des personnes amoindrit les risques et les conséquences d'un accident, particulièrement dans ceux impliquant des matériaux dangereux. Dans le cas des tunnels existants, plusieurs solutions sont envisageables allant d'un concept d'exploitation prévoyant une alternance du trafic de marchandises et du trafic des personnes ou allouant des tunnels à un seul type de trafic, marchandises ou voyageurs, ou encore en fixant une distance minimum entre les convois.

## Résumé

### Collectif d'accidents

Du fait de l'accroissement de la proportion des voies de communication réalisées en souterrain, la sécurité en tunnel est un sujet d'intérêt actuel dans de nombreux pays.

La littérature internationale, les bases de données informatiques et les divers contacts dans le domaine ferroviaire ont permis la collecte d'informations concernant l'état de l'art de la sécurité en tunnel et des cas d'accidents survenus. 176 cas d'accidents impliquant des trains en tunnel ou des métros ont été collectés (figure 1). 49% des cas recensés ont impliqué des incendies.

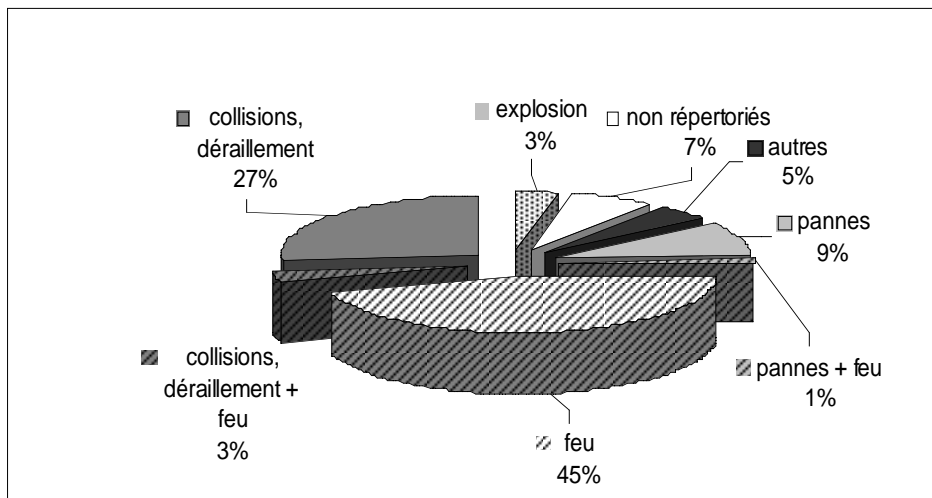


Figure 1 : répartition des situations initiales dans le collectif d'accidents (176 cas)

L'analyse de risque entreprise porte, d'une part sur l'étude de l'ensemble des cas collectés et d'autre part sur l'examen détaillé d'une dizaine de cas d'accidents bien documentés (Tableau 1). Pour ces derniers, le compte rendu de l'accident est décomposé en une séquence multilinéaire d'événements selon la méthode STEP (Sequentially Timed Events Plotting).

Accidents analysés	Date	Situation initiale	Délai d'enfumage	Délai d'attente	Délai de sortie
Crozet (F)	20.3.71	collision + feu	instantané	20	<15 min.
BART, San Francisco (USA)	17.1.79	feu	3 min.	>12 min.	> 48 min.
London Underground (UK)	18.11.87	panne	pas d'enfumage		> 5 h.
Zürich Hirschen (CH)	16.4.91	feu	8 min.	>14 min.	20 min.
Baku (AZ)	29.9.95	feu	?	15 min.	?
Simplon (CH)	20.12.95	feu	instantané	?	> 30 min.

Tunnel sous la Manche (F, UK)	18.11.96	feu	env. 10 min.	30-35 min.	1 h. 30 min.
-------------------------------	----------	-----	--------------	------------	--------------

Tableau 1 : cas d'accidents détaillés

Ces démarches ont permis d'une part la mise en évidence des recommandations de sécurité pertinentes aux tunnels et, d'autre part d'élaboration a priori et systématique de scénarios d'accidents en tunnels. Cette simulation de scénarios est réalisée au moyen d'un logiciel de réseaux de Petri colorés.

## Analyse de cas d'accidents particuliers

L'examen détaillé des quelques cas d'accidents a permis de mettre en évidence des similitudes dans leurs mécanismes. Ces similitudes sont notamment manifestes dans les événements clefs de l'accident (actions ou changement de situation de l'accident) pouvant modifier s

- le nombre d'acteurs et d'événements clefs de l'accident est restreint
- il existe des relations de cause à effet communes entre les événements clefs dans les accidents étudiés
- les conséquences de l'accident sont largement déterminées par l'occurrence d'événements parallèles (p.ex. progression du feu et de l'évacuation des passagers lors d'incendie).

Cette dernière considération met en évidence l'importance du délai d'occurrence des événements clefs de l'accident (délai d'enfumage, d'évacuation), d'où l'intérêt de réduire au maximum la durée de l'évacuation autonome, de l'intervention extérieure et de l'évacuation des passagers.

Ces observations quant au mécanisme des accidents en tunnel permettent par ailleurs de cibler les particularités d'une méthodologie d'analyse projective et systématique. La simulation de ce type de mécanisme accidentel nécessite en effet une représentation de la dynamique parallèle et de la logique temporelle des événements.

## Aspects généraux de la sécurité en tunnel

D'une façon générale, les accidents survenant en voie ouverte sont plus fréquents que les accidents survenant en voie couverte. Le tunnel constitue donc un avantage en termes de probabilités d'occurrence des accidents. D'un autre côté, l'infrastructure peut constituer un facteur aggravant les conséquences de l'accident. Ceci est particulièrement marqué dans le cas d'un incendie.

- Le confinement imposé par l'infrastructure réduit l'occurrence des cas d'accident. Le tunnel protège la voie de communication d'événements indésirables d'origine extérieure au système
- En cas de situation dangereuse l'infrastructure retarde l'accès des secours et l'évacuation des passagers. De plus, en cas d'incendie, l'enfumage de l'espace confiné rend l'attente dans le tunnel périlleuse.

La réduction du risque peut être obtenue par une diminution de la probabilité d'occurrence de l'accident ou par une limitation de ces conséquences. Les mesures de sécurité supplémentaires proposées pour les tunnels visent essentiellement à éviter l'aggravation d'une situation dangereuse en facilitant les secours autonomes, l'intervention et l'évacuation des passagers.

Bien que la construction de ces ouvrages relève des autorités du pays concerné, il existe au niveau international un consensus quant aux mesures de sécurité adéquates. Cet *état de l'art* de la sécurité en tunnel est largement basé sur l'analyse *a posteriori* des cas d'accidents. Les divers concepts de sécurité des ouvrages en exploitation et en projet s'accordent sur les principes proposés ci-dessous.

- La probabilité d'occurrence d'un accident ou d'une situation dangereuse dans le tunnel doit être aussi faible que possible (aussi faible qu'il est techniquement et financièrement possible).
- En cas de difficulté, les véhicules doivent autant que possible (dans l'ordre de priorité) :
  - quitter le tunnel
  - rejoindre une station ou une station intermédiaire
  - s'arrêter à proximité d'un accès vers l'extérieur ou d'un lieu sûr
- Les passagers et le personnel embarqués doivent, le cas échéant, disposer des informations et des moyens nécessaires à leur sauvegarde avant l'arrivée des secours par :
  - des consignes d'évacuation
  - un chemin de fuite
  - un lieu sûr
- Les intervenants extérieurs doivent être en mesure de localiser le lieu de l'accident et, si possible, de communiquer avec le véhicule accidenté.
- Les secours extérieurs doivent être équipés de moyens autonomes d'intervention leur permettant de rejoindre rapidement le lieu du sinistre :
  - un véhicule d'intervention à propulsion autonome
  - des équipements respiratoires
  - des moyens de communication fonctionnant en tunnel
- Un moyen de transport (véhicule normal ou de secours) doit permettre l'évacuation des passagers vers la sortie du tunnel.

## Observations sur les cas d'accidents

L'examen de l'ensemble des informations et sur les cas d'accidents en tunnel étudiés plus en détail a permis d'établir un certain nombre d'observations.

On peut résumer le nombre de situations initiales de l'accident à quatre cas :

- arrêt prolongé du véhicule dans le tunnel,
- arrêt après un choc ,

- l'arrêt en situation dangereuse (feu),
- l'arrêt en situation dangereuse après un choc.

Dans les deux premières situations, le confinement est un facteur aggravant du fait de la durée de l'intervention extérieure et de l'évacuation des passagers. L'infrastructure n'est toutefois pas une source de dommages supplémentaires. Dans le cas d'une situation dangereuse (p.ex. feu), l'infrastructure peut conduire à une aggravation sensible des conséquences de l'accident du fait de la propagation des fumées et des chemins d'accès et de sortie limités. L'expérience a en effet montré que l'enfumage du tunnel (3-10 min.) se produit généralement avant l'arrivée des secours extérieurs.

L'examen des dommages humains dans les accidents collectés met en évidence une distribution atypique des dommages humains :

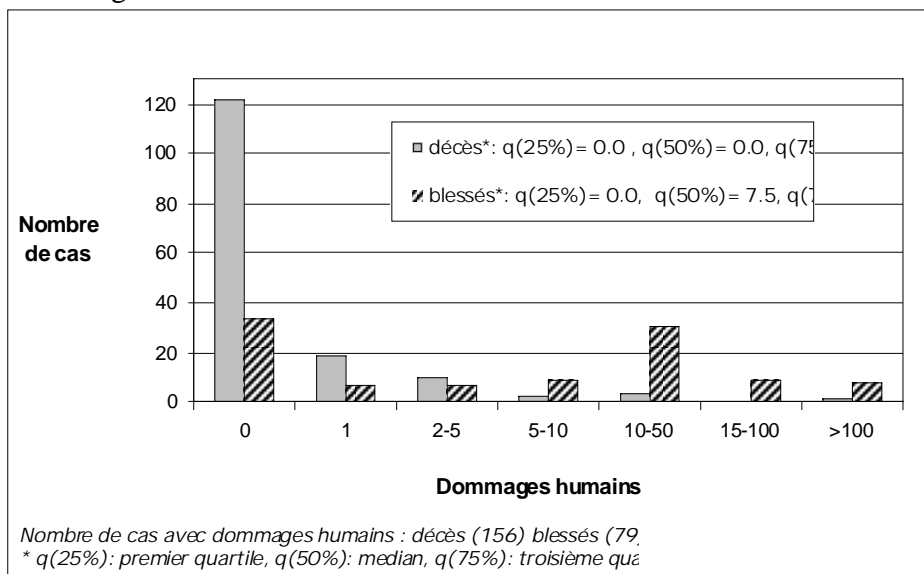


Figure 2 : distribution de la gravité des dommages humains

Les cas réels d'accidents ont mis en évidence l'intérêt d'équipements ou de mesures de sécurité particuliers pour l'exploitation des longs tunnels. Les principaux points à relever sont les suivants :

- Arrêt du véhicule : autant que possible, l'arrêt incontrôlé dans le tunnel doit être évité. Pour faciliter l'évacuation, l'intervention et éviter une situation d'enfumage périlleuse, le véhicule doit continuer jusqu'à la prochaine station ou station intermédiaire.
- Secours autonome : lors d'un arrêt en tunnel en cas d'incendie, les passagers (év. assistés par le personnel du train) doivent être en mesure d'assurer leur propre sécurité jusqu'à l'arrivée des secours. L'infrastructure doit donc permettre aux passagers de rejoindre un lieu sûr par leurs propres moyens.

- Configuration des tunnels : du point de vue de la sécurité, l'usage de deux tunnels à voie unique (configuration {4} et {5}) est préférable à celui d'un tunnel unique à voie double. En cas de problème, l'un des deux tunnels peut être utilisé comme voie d'acheminement des secours et d'évacuation (sans risque de collision avec le véhicule accidenté ou avec les passagers).
- Lieu sûr : les passagers doivent être en mesure d'attendre les secours extérieurs dans un lieu protégé du feu et des fumées. L'expérience a en effet montré que dans les tunnels, les secours extérieurs arrivent rarement avant que la fumée ait envahi le véhicule ou la zone du train rendant la sauvegarde et l'évacuation des passagers problématiques.
- Tunnel de service : la présence d'une galerie technique adjacente au tunnel de circulation peut être utilisée à des fins de sécurité comme voie d'acheminement des secours, lieu sûr, voie d'évacuation ou tunnel de ventilation.
- Interconnexions : l'utilisation du deuxième tube de circulation ou d'un tunnel de service pour des opérations de sécurité nécessite la présence d'interconnexions à intervalles réguliers.
- Gare intermédiaire ou utilisation des puits d'accès : la présence d'une gare intermédiaire dans le tunnel permet de prendre en charge des trains en détresse et d'évacuer directement les passagers vers l'extérieur.

## Génération de scénarios d'accidents en tunnel

Les informations collectées lors de l'analyse STEP ont été utilisées pour l'étude systématique des scénarios d'accident. Un outil de simulation de scénarios d'accidents à été réalisé au moyen de réseaux de Petri colorés. Les réseaux de Petri permettent la simulation dynamique de systèmes fonctionnant en parallèle et en conflit.

Le modèle permet de considérer des relations logiques et temporelles complexes. Tous les scénarios possibles à partir d'une situation initiale, d'acteurs et d'événements donnés sont explorés par l'examen du graphe de marquage généré par la simulation. Les exemples d'application ont été élaborés sur le logiciel de réseaux de Petri colorés *Design CPN* (version 3.04, UNIX).

Malgré le nombre restreint d'acteurs et d'événements considérés, la combinatoire d'événements possibles croît rapidement du fait de la dynamique parallèle. Le nombre d'états possibles pour le système (nombre de nœuds du graphe de marquage) peut être relativement élevé ( $10^4$  nœuds). Toutefois, une telle taille du graphe de marquage n'est pas inhabituelle pour ce type de logiciel et ne constitue pas un obstacle à son exploitation.

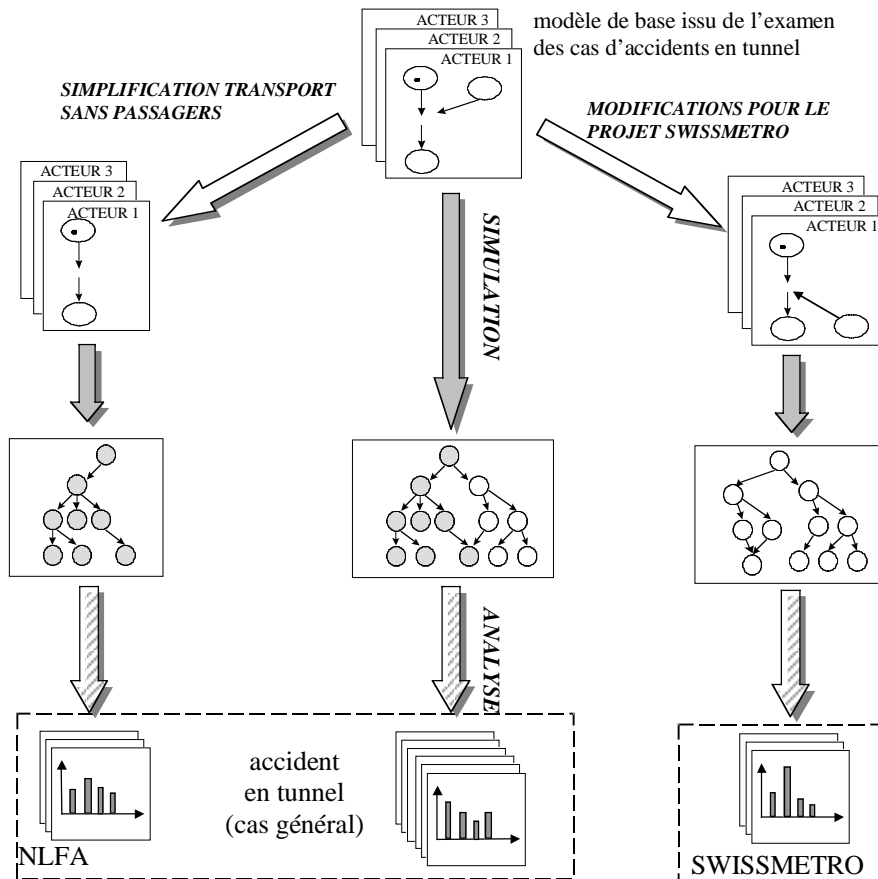


Figure 3 : exemples d'application

Dans un premier temps, l’outil de génération de scénarios d’accidents est appliqué à la situation générale de l’accident en tunnel d’un train passager. Les résultats obtenus dans cet exemple d’application ne sont pas spécifiques à une infrastructure particulière, mais au contraire relativement généraux. Des simulations spécifiques aux cas du Swissmetro et des NLFA sont ensuite réalisées.

Il n’est pas possible d’assimiler entièrement le système Swissmetro à un tunnel ferroviaire. Pour tenir compte des particularités du Swissmetro (p.ex. vide partiel dans le tunnel), le réseau de Petri décrivant le cas général est modifié.

En ce qui concerne le transport des passagers, les NLFA sont assimilables au cas général. De nouvelles simulations ont toutefois été réalisées pour tenir compte du transport marchandises. En effet, dans ce type de transport, les personnes embarquées à bord, limitées à l’équipage de la locomotive, ne peuvent intervenir sur un éventuel début d’incendie lorsque le véhicule est en marche.

Ces applications ont mis en évidence les points suivants :

- les scénarios décrits par la simulation sont cohérents vis-à-vis du déroulement des accidents survenus. La prise en compte du temps dans la simulation permet en effet de mettre en

évidence l'importance de la durée des événements clés de la simulation. Il est remarquable de constater que les événements clés de l'accident surviennent avant un délai de 10 minutes dans les simulations effectuées. Ces résultats semblent confirmer d'une part la nécessité de moyens de secours autonomes et d'autre part la nécessité de mesures de sécurité particulières destinées à faciliter les secours autonomes lors de conditions d'évacuation difficiles (p.ex. enfumage).

- la simulation met en évidence l'importance de certaines séquences d'événements décisives dans le déroulement de l'accident. On peut notamment citer : la réduction du temps de transmission de l'alarme au centre de contrôle, la transmission de l'information (connaissance de exacte de la situation d'accident),...
- il est possible d'évaluer qualitativement l'impact d'un équipement, d'une mesure de sécurité ou d'une configuration du système sur les scénarios possibles de l'accident.

La mise en œuvre de l'outil logiciel est relativement lourde et délicate. C'est pourquoi, le nombre d'exemples d'application (simulations effectuées) est limité. L'élaboration de scénarios d'accident *a priori* présente toutefois d'importants avantages méthodologiques :

- il est possible de simuler, de façon systématique, tous les scénarios d'accidents possibles à partir d'événements et de relations de cause à effet "élémentaires".
- un grand nombre de scénarios d'accidents en tunnel classiques peuvent être générés sur la base d'un collectif de cas.
- Pour les infrastructures présentant des innovations (comme le Swissmetro), il est possible, moyennant une adaptation du modèle, de générer des scénarios d'accident en l'absence de tout retour d'expérience.

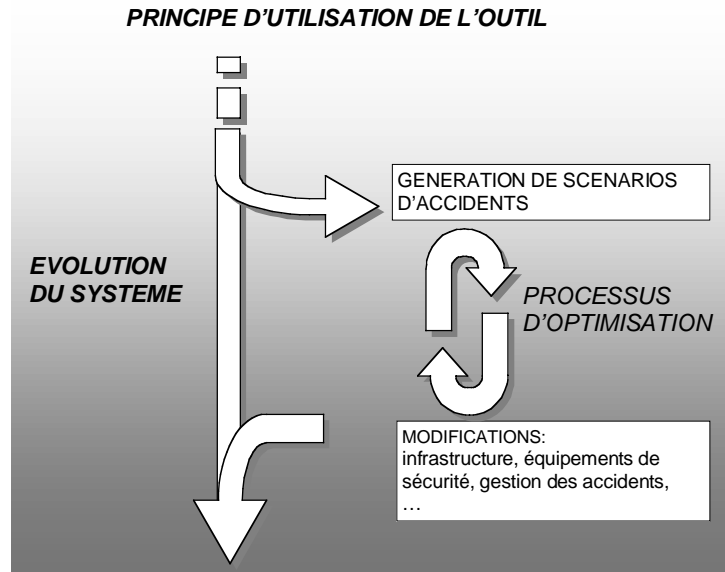


Figure 4 : principe d'application de l'outil aux nouveaux projets

Dans son principe, illustré à la figure 4, la démarche proposée est une méthode itérative destinée à orienter la gestion de la sécurité. Des scénarios d'accidents sont générés sur la base de la description d'une variante du système (configuration, équipements de sécurité,...). L'examen des scénarios d'accidents produits par la simulation devrait permettre l'affinage du système vers une configuration intrinsèquement plus fiable.

## Conclusion

En conclusion, quatre améliorations de la sécurité en tunnel sont proposées :

- les possibilités de sauvetage autonome des voyageurs sont d'une importance capitale et doivent être développées.
- l'information, la communication et la formation des différents acteurs doivent être améliorées.
- l'accès au lieu de l'accident doit être possible par un tunnel non affecté par l'accident
- une séparation du flux de trafic des personnes et des marchandises.

Le récent accident du tunnel routier du Mont-Blanc, non encore analysé, montre l'importance de l'ensemble des moyens évoqués ci-dessus et de façon plus générale, des mesures de sécurité adaptées aux tunnels.

## Kurzfassung

### Das Wichtigste auf einer Seite

**In der vorliegenden Studie werden über 170 Tunnelunfälle ausgewertet und zudem mit einem Simulations-Hilfsmittel Unfallszenarien erzeugt und analysiert.**

**Die vier wichtigsten Schlussfolgerungen lauten: Zunächst sind die Möglichkeiten zur Selbstrettung von Reisenden vor dem Eintreffen der Rettungsmannschaften überlebenswichtig und müssen ausgebaut werden. Weiter muss die Information, Kommunikation und Ausbildung aller Beteiligten verbessert werden. Drittens soll der Zugang zum Unfallort über eine abgetrennte zweite Röhre mit häufigen Querverbindungen erreichbar sein (dies kann auch die Röhre für den Gegenverkehr sein). Und als Viertes sind Güter- und Personenverkehr bestmöglich zu trennen.**

#### **Selbstrettung entscheidend**

Unfälle in einem Tunnel sind zwar seltener als auf offener Strecke, doch die Folgen sind vor allem bei einem Brand häufig verheerend. Die ersten zehn Minuten nach dem Unfall sind für das Überleben der Reisenden entscheidend, denn in fast allen Fällen füllt sich nach drei bis zehn Minuten der Tunnel mit dichtem Rauch. Die Rettungsmannschaften treffen durchwegs deutlich später ein.

Deshalb muss die Alarmierungszeit verkürzt werden. Vordringlich ist auch, die Möglichkeiten zur Selbstrettung von Zugpassagieren und Autoinsassen zu verbessern. Nebst Löschmöglichkeiten, Schutzräumen und einer guten Bezeichnung der Fluchtwege ist vor allem die Information vor der Einfahrt in den Tunnel wichtig. Häufig sind in schweizerischen Tunnels zwar Schutzräume und Rettungsgeräte vorhanden, die Reisenden sind aber über das richtige Verhalten nicht informiert. Was für Flugpassagiere vor dem Start Routine ist, nämlich eine Instruktion über die Notfallmassnahmen, fehlt für Bahn- und Strassenbenutzer meist völlig.

#### **Kommunikation und Ausbildung als häufige Schwachstelle**

Eine weitere Schwachstelle bei vielen untersuchten Unfällen ist die Kommunikation zwischen allen Beteiligten, vor allem zwischen Tunnelbetreibern und Feuerwehr, die auch unter erschwerten Umständen im rauchgefüllten Tunnel gut funktionieren muss. Erhöhten Anforderungen müssen auch die Rettungsteams standhalten können (Atemschutzgeräte, Antrieb der Fahrzeuge).

#### **Dritte Röhre nicht zwingend**

Beim Bau von Tunneln ist darauf zu achten, dass die Retter eine Unfallstelle durch eine unabhängige Tunnelröhre erreichen können. Eine dritte Röhre ist dafür nicht unbedingt nötig, es genügt auch eine abgetrennte Röhre für den Verkehr in der Gegenrichtung mit regelmässigen Querverbindungen und Schutzräumen.

#### **Trennung der Verkehrsströme**

Eine Trennung von Güter- und Personenverkehr kann die Unfallfolgen ebenfalls vermindern, vor allem bei Unfällen mit gefährlicher Ladung. Bei bestehenden Tunnel könnten allenfalls die Fahrpläne angepasst werden, um Güter- und Personenverkehr zeitlich besser zu trennen.

## Zusammengetragene Unfälle

Angesichts der steigenden Zahl von unterirdischen Kommunikationswegen ist die Sicherheit im Tunnel in zahlreichen Ländern ein aktuelles Thema.

Die internationale Literatur, elektronische Datenbanken und zahlreiche Kontakte im Eisenbahnbereich haben es erlaubt, Informationen über den neuesten Stand der Sicherheit in Tunnels und die eingetretenen Unfälle zusammenzutragen. Es wurden 176 Unfälle in Verbindung mit Zügen in Tunnels oder Untergrundbahnen (Abb. 1) registriert, und in 49% der Fälle kam es zu Bränden.

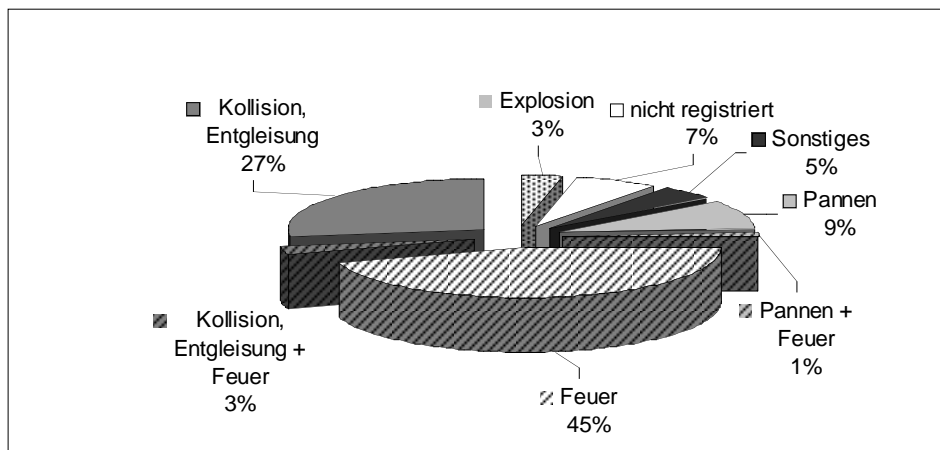


Abb. 1 : Aufteilung der Ausgangssituationen der zusammengetragenen Unfälle (176 Fälle)

Die Risikoanalyse geht einerseits auf die Analyse aller berücksichtigten Fälle und andererseits auf die ausführliche Untersuchung von rund zehn genau belegten Unfällen (Tableau 1) ein. Bei letzteren ist der Unfallbericht in eine multilineare Abfolge der Ereignisse gemäss der Methode STEP (Sequentially Timed Events Plotting) gegliedert.

Analysierte Unfälle	Datum	Ausgangs-situation	Rauch-entwicklung	Wartezeit	Rettungs-dauer
Crozet (F)	20.3.71	Kollision + Feuer	sofort	20	<15 Min.
BART, San Francisco (USA)	17.1.79	Feuer	3 Min.	>12 Min.	> 48 Min.
London Underground (UK)	18.11.87	Panne	kein Rauch		> 5 Std.
Zürich Hirschen (CH)	16.4.91	Feuer	8 Min.	>14 Min.	20 min.
Baku (AZ)	29.9.95	Feuer	?	15 Min.	?
Simplon (CH)	20.12.95	Feuer	sofort	?	> 30 Min.
Ärmelkanaltunnel (F, UK)	18.11.96	Feuer	ca. 10 Min.	30-35 Min.	1.30 Std.

Tabelle 1 : Detaillierte Aufstellung von Unfällen

Aufgrund dieses Vorgehens konnten einerseits die Sicherheitsempfehlungen für Tunnels hervorgehoben und andererseits systematische und a priori Unfallszenarien in Tunnels ausgearbeitet werden. Diese Simulation von Szenarien erfolgt mittels einer farbigen Petri-Netz-Software.

## Analyse einzelner Unfälle

Aufgrund von ausführlichen Untersuchungen einzelner Unfälle konnten ähnliche Mechanismen aufgezeigt werden. Diese Ähnlichkeiten sind insbesondere bei den Schlüsselereignissen des Unfalls anzutreffen (Aktionen oder veränderte Unfallsituationen, die zu signifikanten Änderungen der Unfallfolgen führen können) :

- die Anzahl Akteure und Schlüsselereignisse des Unfalls sind begrenzt
- es bestehen gemeinsame Kausalbeziehungen zwischen den Schlüsselereignissen der untersuchten Unfälle
- die Unfallfolgen hängen hauptsächlich vom Vorhandensein paralleler Ereignisse ab (z.B. Fortschreiten des Feuers und der Evakuierung der Passagiere bei Bränden).

Diese letzte Überlegung zeigt auf, dass die Zeitspanne, in der die Schlüsselereignisse des Unfalls eintreten, von grösster Bedeutung ist (Dauer der Rauchentwicklung, Evakuierung). Deswegen ist die Dauer der autonomen Evakuierung, externen Intervenierung und Evakuierung der Passagiere auf ein Maximum zu reduzieren.

Aufgrund dieser Beobachtungen können bezüglich des Mechanismus bei Unfällen in Tunnels zudem die Besonderheiten einer projektiven und systematischen Analysemethode gezeigt werden. Die Simulation eines solchen Unfallmechanismus erfordert eine Darstellung der parallelen Dynamik und der zeitlichen Logik der Ereignisse.

## Allgemeine Aspekte der Sicherheit im Tunnel

Die Zahl der Unfälle auf offenen Fahrwegen ist allgemein höher als auf bedeckten Wegen. Ein Tunnel stellt somit einen Vorteil bezüglich der Wahrscheinlichkeit eines Unfalls dar. Andererseits kann die Infrastruktur die Unfallfolgen verschlimmern, insbesondere bei einem Brand.

- Die durch die Infrastruktur vorhandene räumliche Eingrenzung reduziert das Vorkommen von Unfällen. Der Tunnel schützt den Kommunikationsweg von unerwünschten Ereignissen externen Ursprungs.
- Bei gefährlichen Situationen verzögert die Infrastruktur den Zugang der Rettungsmannschaften und die Evakuierung der Passagiere. Im Falle eines Brandes kann durch die Rauchentwicklung im geschlossenen Raum das Warten im Tunnel zudem gefährlich werden.

Eine Verringerung des Risikos kann durch eine reduzierte Wahrscheinlichkeit eines Unfalls oder durch Verminderung der Folgen erreicht werden. Die vorgeschlagenen zusätzlichen

Sicherheitsmassnahmen für Tunnels zielen hauptsächlich darauf ab, die Verschlimmerung einer gefährlichen Situation zu verhindern, indem die autonome Rettung, die Intervenierung und die Evakuierung der Passagiere vereinfacht werden.

Obwohl für den Bau von Tunnels die Behörden des jeweiligen Landes zuständig sind, gibt es auf internationaler Ebene einen Konsens hinsichtlich angemessener Sicherheitsmassnahmen. Dieser *Stand der Technik* bezüglich der Sicherheit im Tunnel beruht vor allem auf der Analyse *a posteriori* von Unfällen. Die verschiedenen Sicherheitskonzepte der in Betrieb stehenden sowie der geplanten Werke stimmen mit den unten stehenden Grundsätzen überein.

- Die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls oder einer gefährlichen Situation in einem Tunnel muss so gering wie möglich sein (so gering, wie dies technisch und finanziell möglich ist)
- Bei Problemen müssen die Fahrzeuge wann immer möglich (nach Prioritätenordnung) :
  - den Tunnel verlassen
  - eine Station oder eine Zwischenstation erreichen
  - in der Nähe eines Ausganges oder eines sicheren Ortes anhalten
- Die Passagiere und das Personal müssen gegebenenfalls bevor Rettung kommt über Informationen und Hilfen zu ihrem Schutz verfügen :
  - Weisungen für die Evakuierung
  - einen Fluchtweg
  - einen sicheren Ort
- Die ausserhalb des Tunnels befindlichen Personen müssen den Unfallort genau bestimmen und, wenn möglich, mit dem verunfallten Fahrzeug kommunizieren können
- Die ausserhalb des Tunnels befindlichen Rettungsmannschaften müssen mit autonomen Einsatzeinrichtungen ausgerüstet sein, so dass sie den Unfallort rasch erreichen können :
  - Einsatzfahrzeug mit autonomen Antrieb
  - Atmungsgeräte
  - Kommunikationsapparate, die im Tunnel funktionieren
- Ein Transportmittel (normales oder Rettungsfahrzeug) hat die Evakuierung der Passagiere zum Tunnelausgang zu gewährleisten.

## Beobachtungen zu den Unfällen

Die Untersuchung aller Informationen sowie jener über ausführlicher geprüfte Unfälle in Tunnels erlaubt die Festlegung einer bestimmten Anzahl Beobachtungen.

Die Ausgangssituationen bei Unfällen können auf vier Fälle zusammengefasst werden :

- verlängerter Stillstand des Fahrzeugs im Tunnel,
- Stillstand nach einem Aufprall,
- Stillstand aufgrund einer gefährlichen Situation (Feuer),
- Stillstand aufgrund einer gefährlichen Situation nach einem Aufprall.

In den beiden ersten Situationen stellt die räumliche Eingrenzung einen Faktor dar, der die Situation verschlimmern kann, da es länger dauert, bis externe Hilfe kommt und die Passagiere evakuiert werden können. Die Infrastruktur löst jedoch nicht zusätzliche Schäden aus. Im Falle einer gefährlichen Situation (z.B. Feuer) kann die Infrastruktur aufgrund der Rauchentwicklung und begrenzter Zu- und Ausgänge zu weit schlimmeren Unfallfolgen führen. Die Erfahrung hat in der Tat gezeigt, dass die Rauchentwicklung im Tunnel (3-10 Min.) gewöhnlich einsetzt, bevor die Rettung von aussen erfolgt.

Die Erforschung der Schäden am Menschen bei den untersuchten Unfällen hebt eine atypische Verteilung dieser Schäden hervor :

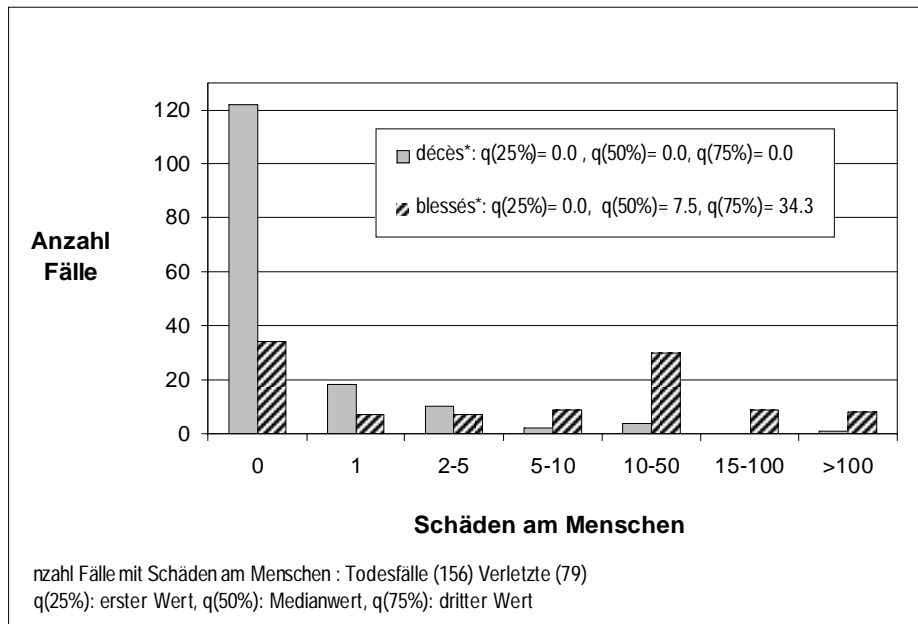


Abb. 2 : Verteilung der Schwere der Schäden am Menschen

Die tatsächlich eingetretenen Unfälle haben die Bedeutung von besonderen Sicherheitsanlagen oder -massnahmen beim Betrieb von langen Tunnels hervorgehoben. Die wichtigsten Punkte sind:

- Stillstand des Fahrzeugs : wann immer möglich ist ein unkontrollierter Stillstand im Tunnel zu vermeiden. Damit die Evakuierung oder die Rettung vereinfacht und eine gefährliche Rauchentwicklungssituation verhindert werden können, muss das Fahrzeug bis zur nächsten Station oder Zwischenstation weiterfahren.
- Autonome Rettung : Bei einem Stillstand in einem Tunnel im Falle eines Brandes müssen die Passagiere (ev. mit Unterstützung durch das Zugpersonal) fähig sein, bis zum Eintreffen der Rettungsmannschaften für ihre eigene Sicherheit zu sorgen. Die Infrastruktur muss also gewährleisten, dass die Passagiere einen sicheren Ort allein erreichen können.
- Konfiguration der Tunnels : aus Sicht der Sicherheit sind zwei einspurige Tunnels (Konfiguration {4} und {5}) einem einzigen, doppelspurigen Tunnel vorzuziehen. Bei

Problemen kann einer der zwei Tunnels als Rettungs- und Evakuierungsweg benutzt werden (ohne Risiko einer Kollision mit dem verunfallten Fahrzeug oder mit den Passagieren).

- Sicherer Ort : es ist sicherzustellen, dass die Passagiere an einem vor Feuer und Rauch geschützten Ort auf externe Hilfe warten können. Die Erfahrung hat gezeigt, dass in Tunnels in den meisten Fällen die Hilfe von aussen erst erfolgt, nachdem der Rauch bereits in das Fahrzeug oder die Zone des Zugs eingedrungen ist, was die Rettung und Evakuierung der Passagiere problematisch gestaltet.
- Diensttunnel : ein am Verkehrstunnel angrenzender technischer Stollen kann für Sicherheitseinsätze als Weg für die Rettungsmannschaften, sicheren Ort, Evakuierungsweg oder Lüftungstunnel benutzt werden.
- Interkonnektionen : die Benutzung einer zweiten Verkehrsröhre oder eines Diensttunnels für Sicherheitsoperationen erfordert Interkonnektionen in regelmässigen Abständen.
- Zwischenstation oder Benutzung von Zugangsschächten : eine Zwischenstation im Tunnel ermöglicht, dass in Not geratene Züge in Gewahr genommen und die Passagiere direkt nach aussen evakuiert werden können.

## Generieren von Unfallszenarien im Tunnel

Die anlässlich der STEP-Analyse gesammelten Informationen wurden für systematische Studien von Unfallszenarien verwendet. Ein Tool für die Simulation von Unfallszenarien wurde mittels farbiger Petri-Netze erstellt. Die Petri-Netze ermöglichen die dynamische Simulation von parallelen und Konfliktsystemen.

Mit dem Modell können komplexe logische und zeitliche Relationen berücksichtigt werden. Alle möglichen, von einer Ausgangssituation, von Akteuren oder Ereignissen ausgehenden Szenarien werden durch die Untersuchung des von der Simulation generierten Markierungsgraphs erforscht. Die Anwendungsbeispiele wurden anhand der farbigen Petri-Netz-Software *Design CPN* (Version 3.04, UNIX) erstellt.

Trotz der begrenzten Anzahl berücksichtigter Akteure und Ereignisse steigen die kombinatorisch möglichen Ereignisse aufgrund der parallelen Dynamik rasch an. Die Anzahl der für das System möglichen Zustände (Anzahl Knoten des Markierungsgraphs) kann relativ hoch sein ( $10^4$  Knoten). Eine solche Grösse des Markierungsgraphs ist für diese Art von Software jedoch nicht ungewöhnlich und für seine Anwendung nicht hinderlich.

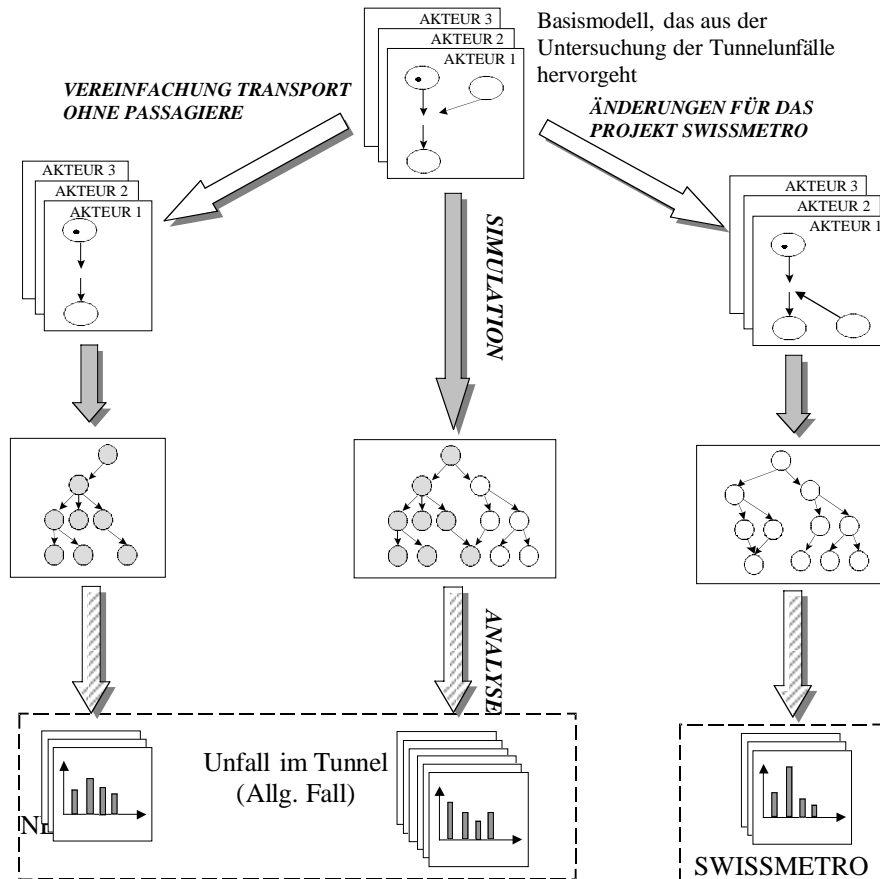


Abbildung 3 : Anwendungsbeispiele

In einer ersten Phase wird das Tool für die Generierung von Unfallszenarien für die allgemeine Unfallsituation im Tunnel eines Personenzuges verwendet. Die in diesem Anwendungsbeispiel erhaltenen Resultate entsprechen nicht einer besonderen Infrastruktur, sondern sind im Gegenteil relativ allgemein. Anschliessend werden spezifische Simulationen für Swissmetro und die NEAT realisiert.

Das Swissmetro-System kann nicht vollständig einem Eisenbahntunnel zugeordnet werden. Damit die Besonderheiten von Swissmetro berücksichtigt werden können (z.B. Teilvakuum im Tunnel), wird das Petri-Netz, das die allgemeinen Fälle beschreibt, abgeändert.

Was den Personenverkehr betrifft, wird die NEAT mit dem allgemeinen Fall verglichen. Für die Berücksichtigung des Güterverkehrs wurden jedoch neue Simulationen entwickelt. Bei dieser Art von Transport können die an Bord befindlichen Personen, die sich auf das Personal der Lokomotive beschränken, bei einem eventuellen Feuersausbruch nicht intervenieren, wenn das Fahrzeug in Bewegung ist.

Diese Anwendungen haben folgende Punkte hervorgehoben :

- die durch die Simulation beschriebenen Szenarien sind gegenüber dem Ablauf der ereigneten Unfälle kohärent. Aufgrund der Berücksichtigung der Zeit anlässlich der Simulation kann die

Bedeutung der Dauer der Schlüsselereignisse der Simulation hervorgehoben werden. Bemerkenswert ist, dass die Schlüsselereignisse des Unfalls in den durchgeführten Simulationen 10 Minuten vorher eintreten. Diese Resultate scheinen einerseits die Notwendigkeit autonomer Rettungshilfen und andererseits die Notwendigkeit besonderer Sicherheitsmassnahmen zur Vereinfachung der autonomen Rettung bei schwierigen Evakuierungsbedingungen (z.B. Rauchentwicklung) zu bestätigen.

- die Simulation zeigt die wichtige Bedeutung einiger entscheidender Ereignissabläufe bei der Unfallabfolge auf, wie : Reduzierung der Transmissionsdauer des Alarms im Kontrollzentrum, die Informationsübermittlung (genaue Kenntnis der Unfallsituation), ...
- es ist möglich, den Einfluss einer Einrichtung, einer Sicherheitsmassnahme oder einer Konfiguration des Systems auf die möglichen Unfallszenarien qualitativ zu bewerten.

Der Gebrauch des Softwaretools ist relativ schwierig und heikel. Deswegen ist die Anzahl der Anwendungsbeispiele (durchgeführte Simulationen) begrenzt. Die Erarbeitung von *a priori*-Unfallszenarien bietet trotzdem wichtige methodologische Vorteile :

- es ist möglich, alle möglichen Unfallszenarien ausgehend von Ereignissen und “elementaren” Kausalbeziehungen systematisch zu simulieren,
- eine grosse Anzahl Szenarien von klassischen Unfällen im Tunnel können auf der Basis von kollektiven Fällen generiert werden,
- für Infrastrukturen mit Innovationen (wie Swissmetro) ist es möglich, mittels einer Anpassung des Modells Unfallszenarien zu generieren, die auf keine Erfahrung zurückgehen.

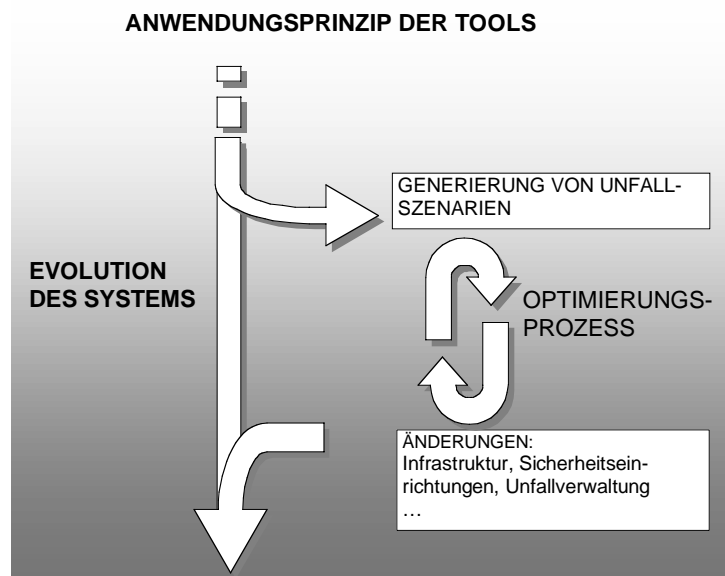


Abbildung 4 : Anwendungsprinzip des Tools für neue Projekte

Das vorgeschlagene Vorgehen, wie in Abbildung 4 dargestellt, ist in seinem Prinzip eine iterative Methode, die der Sicherheitsverwaltung eine Orientierung geben soll. Unfallszenarien werden auf der Basis der Beschreibung einer Systemvarianten generiert (Konfiguration, Sicherheitseinrichtungen, ...). Die Untersuchung der durch Simulation erstellten Unfallszenarien sollte die Verfeinerung des Systems erlauben, nämlich eine grundsätzlich zuverlässigere Konfiguration.

## Schlussfolgerung

Als Schlussfolgerung werden vier Verbesserungen bei der Sicherheit im Tunnel vorgeschlagen :

- die Möglichkeiten einer autonomen Rettung der Reisenden sind entscheidend und müssen weiter entwickelt werden,
- die Information, die Kommunikation und die Ausbildung der verschiedenen Akteure müssen verbessert werden,
- der Zugang zum Unfallort muss durch einen Tunnel ermöglicht werden, der nicht vom Unfall betroffen ist,
- eine Trennung der Verkehrsflüsse von Personen und Gütern.

Die kürzliche und noch nicht analysierte Brandkatastrophe im Montblanc-Strassentunnel zeigt die wichtige Bedeutung, die den oben genannten Sicherheitsmassnahmen für Tunnels zukom

## Summary

### The essential at one page

The study entitled "Risk Analysis of Accidents in Tunnels" analyses more than 170 cases of accidents in tunnels and also generates simulated scenarios of accidents.

Four conclusions are drawn: First, travellers self-rescue must be improved in order to increase the chances of survival immediately after the accident, and before rescue services arrive on the scene. Secondly, all people involved need better information, communication, and training. Thirdly, the access on the place of the accident must be possible by means of a separate (service) tunnel (alternatively the tunnel for the contra-flow traffic could be used for this purpose). Finally, goods and passenger transportation must be segregated as much as possible.

#### **Decisive autonomous rescue.**

Although the accidents in tunnels are rarer than those on opened ways, their consequences, particularly in the event of fire, are much more serious. The first ten minutes are decisive for the survival of the travellers. In the event of fire, smoke very quickly invades the tunnel, and this well before the rescue squads arrive on the spot of the accident. It is necessary to give to the railway and road passengers, the possibility to organise their own evacuation (autonomous rescue or coil rescue).

In addition to the extinguishers, rescue areas and clear indication of the way of escape, information at the entry of the tunnel is also important. In the tunnels, rescue equipment and life preservers are often at disposal, but the travellers are not or badly informed of their use. Safety instructions commonly given to plane passengers are completely lacking for railroad or road passengers.

#### **Communication and formation: frequent weaknesses.**

Accident analysis reveals the lack of communication between the various actors (tunnel operators and staff of intervention). Under the difficult conditions of a smoky tunnel, communication is primordial.

#### **Third does not tube essential.**

During the construction of tunnels, it is important that the rescuers can access to the place of accident through an emergency way. There is no need of a third tube. The second tube of the traffic in opposite direction will do, if connected at regular intervals to the first tube.

#### **Separation of flows of traffic.**

To separate the traffic from the goods of that of the passengers reduces the risks and the consequences of accidents, particularly in those implying dangerous materials. For the existing tunnels, several solutions are possible going from alternating the goods traffic and the traffic of the people or dedicating tunnels to only one kind of traffic, goods or travellers, or by fixing a distance minimum between the convoys.

## Accidents recorded

Given the growth in the proportion of means of communication that are being built underground, tunnel safety is a subject of current interest in many countries.

It has been possible, from international literature, computer data bases and various contacts in railway circles, to compile information on the state of the art in tunnel safety and on cases of accidents which have occurred. A total of 176 cases of accidents involving trains in tunnels or underground railways have been compiled (Figure 1). Of these, 49% involved fires.

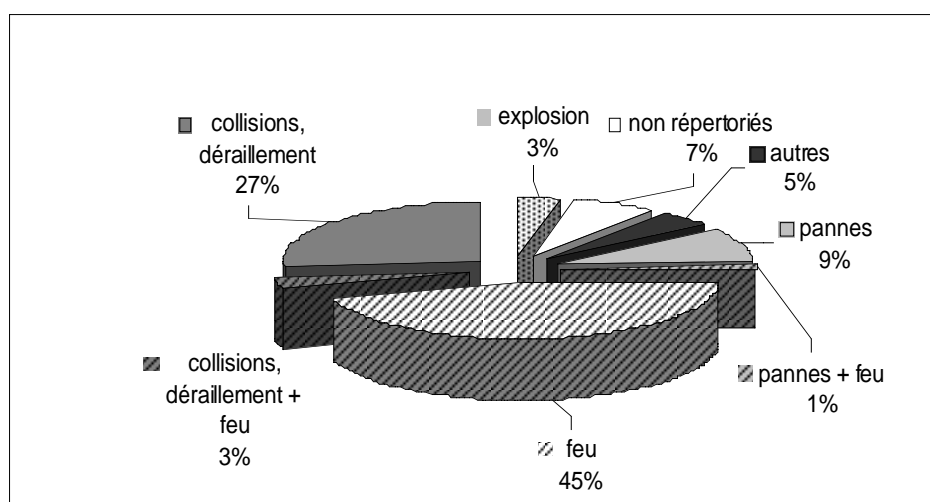


Figure 1 : Breakdown of initial situations in the accidents recorded (176 case)

Risk analysis involves, on the one hand, a study of all the cases recorded and, on the other, the detailed examination of about ten well-documented cases of accidents (Table 1). The accident reports on the latter have been broken down into a multi-linear sequence of events according to the STEP method (Sequentially Timed Events Plotting).

Analyzed accidents	Date	Situation initial	Smoking time	Waiting time	Exit time
Crozet (F)	20.3.71	collision + fire	instantaneous	20	<15 min.
BART, San Francisco (USA)	17.1.79	fire	3 min.	>12 min.	> 48 min.
London Underground (UK)	18.11.87	Break-down	No smoking		> 5 h.
Zürich Hirschengraben (CH)	16.4.91	fire	8 min.	>14 min.	20 min.
Baku (AZ)	29.9.95	fire	?	15 min.	?
Simplon (CH)	20.12.95	fire	instantaneous	?	> 30 min.
Tunnel sous la Manche (F, UK)	18.11.96	fire	approx. 10 min.	30-35 min.	1 h. 30 min.

Table 1 : Cases of detailed accidents

This procedure, on one hand, made it possible to highlight tunnel safety recommendations and, on the other, to prepare *a priori* and systematic scenari of accidents in tunnels. This scenario simulation is performed by means of a coloured Petri network program.

## Analyses of specific cases of accidents

A detailed examination of certain cases of accidents made it possible to demonstrate similarities in their mechanisms. These similarities are particularly evident in the key events of the accidents (where certain actions or changes in accident situations could change):

- the number of persons involved and the key events of the accident are limited
- there is a cause and effect relationship common to the key events of the accidents studied
- the consequences of the accidents are largely determined by the parallel occurrence of events(e.g. progress of the fire and the evacuation of the passengers during the fire).

This last consideration shows the importance of the timing of the key events in the accident (smoke-fill and evacuation times), which is why self-help evacuation, external assistance and passenger evacuation time must be reduced to a minimum.

These comments on the mechanism of accidents in tunnels also make it possible to pinpoint the characteristics of a projective and systematic methodological analysis. The simulation of this type of accident mechanism in fact requires the representation of the dynamic parallels and time logics of the events.

## General aspects of safety in tunnels

Generally speaking, accidents occurring on an open track or road are more frequent than those occurring on one that is enclosed. The tunnel therefore constitutes an advantage in terms of the probabilities of accidents occurring. Conversely, however, the infrastructure can constitute an aggravating factor for the consequences of an accident. This is particularly so in the case of fire.

- The confinement of the infrastructure reduces the occurrence of cases of accident. The tunnel protects the communication track from undesirable events originating externally to the system
- In cases of dangerous situations, however, the infrastructure delays the access of the rescue teams and the evacuation of the passengers. Furthermore, in cases of fire, the smoke-fill of the confined space makes waiting in the tunnel dangerous.

A risk reduction can be brought about by a decrease in the likelihood of an accident occurring or by limiting its consequences. Additional safety measures proposed for tunnels aim essentially at avoiding the aggravation of a dangerous situation while facilitating self-rescue, assistance and the evacuation of the passengers.

Although the authorities of the country concerned are responsible for the construction of these tunnels, there is an international consensus on adequate safety measures. This *state of the art* in

tunnel safety is broadly based on the analysis of past cases of accident. The various safety plans of tunnels in operation and being planned agree on the principles proposed below.

- The likelihood of an accident or a dangerous situation occurring in the tunnel must be as low as possible (as low as is technically and financially possible).
- In the case of difficulty, the vehicles must, as far as possible (in order of priority) :
  - leave the tunnel
  - reach a station or an intermediate station
  - stop near to an access to the exterior or a safe place
- The passengers and on-board personnel must, where applicable, have access to information and the necessary means to save themselves until help arrives. These are:
  - evacuation instructions
  - an escape route
  - a safe place
- External rescuers must be in a position to localise the point where the accident occurred and, if possible, to communicate with the damaged vehicle.
- The external rescuers must be equipped with autonomous means of action so that they can quickly reach the location of the accident:
  - a self-powered rescue vehicle
  - breathing equipment
  - means of communication that work in the tunnel
- A means of transport (normal or rescue vehicle) with which the passengers can be evacuated to the tunnel exit.

## Observations on cases of accidents

A more detailed examination of the body of information and the cases of accidents in tunnels studied has made it possible to formulate a number of observations.

The number of initial accident situations can be reduced to four cases:

- prolonged stoppage of the vehicle in the tunnel,
- stoppage after an impact,
- stoppage in a dangerous situation (fire),
- stoppage in a dangerous situation after an impact.

In the first two situations, the confinement is an aggravating factor because of the time it takes for external assistance to arrive and for the evacuation of the passengers. The infrastructure is nevertheless not a source of additional damage. In the case of a dangerous situation (e.g. fire), the infrastructure can lead to a considerable aggravation of the consequences of the accident because of the propagation of smoke and the limitation of the access and exit routes. Experience has, in

fact, shown that the tunnel smoke-fill (3-10 min.) generally occurs before the arrival of external assistance.

The examination of human damage in the accidents considered reveals that it is atypically distributed:

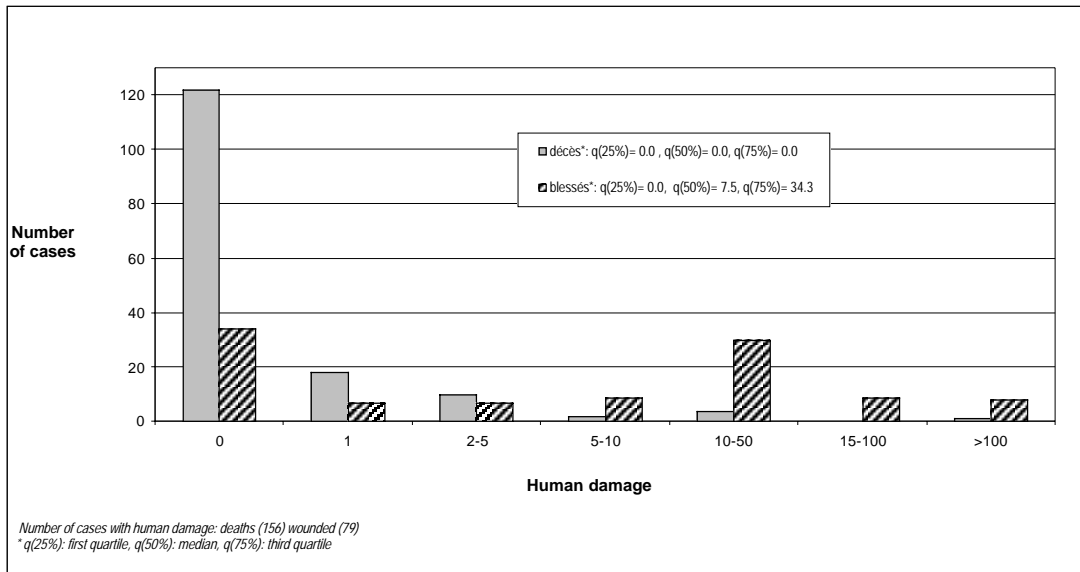


Figure 2 : Distribution of the gravity of human damage

Actual cases of accident demonstrate the interest of special safety equipment or measures for the operation of long tunnels. The main points to note are the following:

- Stoppage of vehicle: As far as possible, uncontrolled stoppage in the tunnel must be avoided. To facilitate evacuation and assistance and to avoid a dangerous smoke-fill situation, the vehicle must continue to the next station or intermediate station.
- Self-rescue: when there is a stoppage in the tunnel in cases fire, the passengers (possibly attended by the train crew) must be in a position to ensure their own safety until the arrival of the rescuers. The infrastructure has, therefore, to be such as to permit the passengers to reach a safe place by their own means.
- Configuration of tunnels: from a safety viewpoint, the use of two one-way tunnels (configurations {4} and {5}) is preferable to that of a single two-way tunnel. In problem cases, one of the two tunnels can be used as a rescue and evacuation route (without risks of collision with the damaged vehicle or with the passengers).
- Safe place: the passengers must be able to await external assistance in a place protected from the fire and smoke. Experience has, in fact, shown that in tunnels, external assistance rarely arrives before the smoke has filled the vehicle or the train area, thus making passenger rescue and evacuation problematic.

- Service tunnel: if there is a technical gallery adjacent to the traffic tunnel, it can be used for safety purposes as a rescue route, a safe place, an evacuation route or a ventilation tunnel.
- Interconnections: the use of the second traffic tube or service tunnel for safety operations requires interconnections at regular intervals.
- Intermediate railway station or the use of access shafts: the presence of an intermediate railway station in the tunnel makes possible access to trains in distress and the direct evacuation of passengers to the exterior.

## Scenari of the generation of accidents in tunnels

The information compiled at the time of the STEP analysis was used for the systematic study of accident scenari. An accident scenario simulation tool has been produced using coloured Petri networks. The Petri networks permit dynamic simulation of systems working in parallel and in conflict.

With this model it is possible to consider complex logical and temporal relations. All the possible scenari using a given initial situation, persons involved and given events are explored by examining the marking graph generated by the simulation. Application examples were prepared on the *Design CPN* (version 3.04, for UNIX) coloured Petri network software.

Despite the limited number of persons and events considered, the combinations of possible events grow rapidly because of the dynamic parallels. The number of possible states for the system (number of nodes on the marking graph) can be relatively high ( $10^4$  nodes). Nevertheless, a marking graph of such proportions is not unusual for this type of software and in no way precludes its use

To start with, the accident scenario generation tool is applied to the general situation of a passenger train accident in a tunnel. The results obtained in this application example are not specific to a special infrastructure but are, conversely, relatively general. Then simulations specific to the cases of Swissmetro and NLFA were conducted.

It is not possible completely to assimilate the Swissmetro system to a railway tunnel. To take account of the special characteristics of Swissmetro (e.g. partial vacuum in the tunnel), the Petri network describing the general case is modified.

With regard to passenger transport, the NLFAs are comparable to the general case. But new simulations were nevertheless carried out to take account of goods transport. In fact, in this type of transport, the on-board personnel, limited to the locomotive crew, cannot do anything about a fire breaking out while the vehicle is in motion.

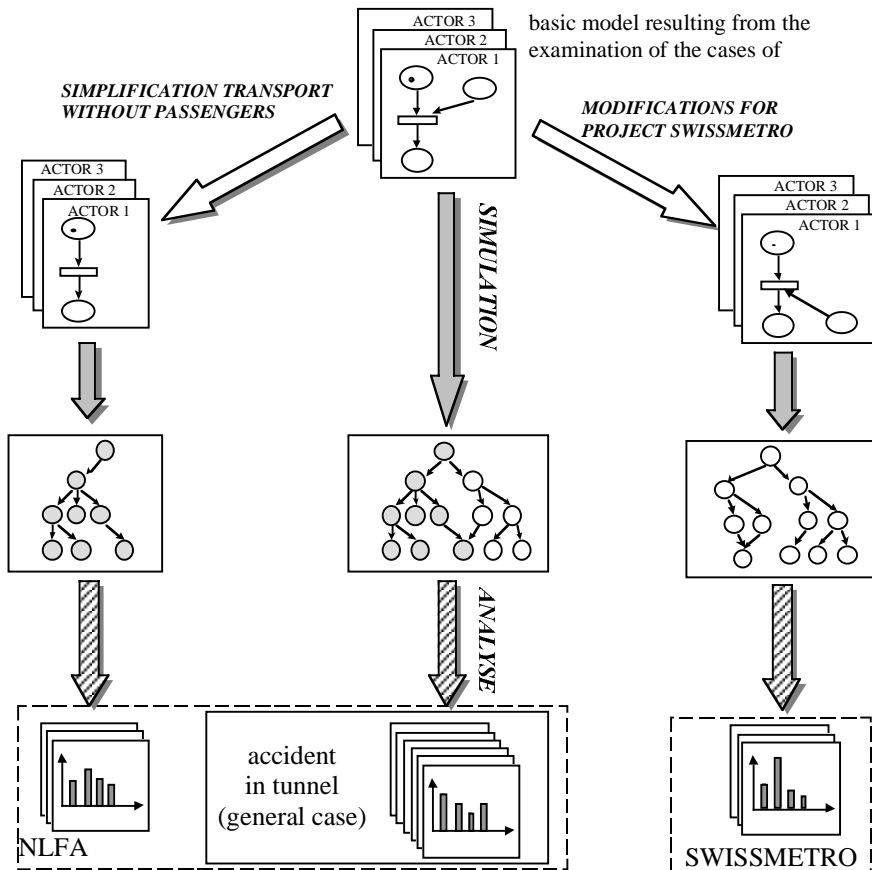


Figure 3 : Application examples

These applications demonstrated the following points:

- The scenario described by the simulation is coherent with respect to the occurrence of accidents. By taking time into account in the simulation, it is, in fact, possible to demonstrate the importance of the length of key events in the simulation. It is remarkable to note that the key events of the accident occur within 10 minutes in the simulation effected. These results seem to confirm, on the one hand, the need for means of self-help and, on the other, the need for special safety measures to facilitate self-help in difficult evacuation conditions (e.g. smoke-fill).
- simulation highlights the importance of certain sequences of decisive events in the occurrence of the accident. Particular mention can be made, *inter alia*, of the reduction of the time required to transmit the alarm to the control centre and the transmission of information (exact knowledge of the accident situation).
- it is possible qualitatively to evaluate the impact of a piece of equipment, a safety measure or a system configuration on the possible accident scenario.

The use of the software tool is comparatively cumbersome and delicate. That is why the number of application examples (simulations effected) is limited. The preparation of *a priori* accident scenarios does, nevertheless, offer major methodological advantages:

- it is possible systematically to simulate all the possible accident scenari from events and "elementary" cause-and-effect relationships.
- a large number of classical tunnel accident scenari can be generated on the basis of a group of cases.
- for infrastructures involving innovations (such as Swissmetro), it is possible, by adapting the model, to generate accident scenari in the absence of any prior experience.

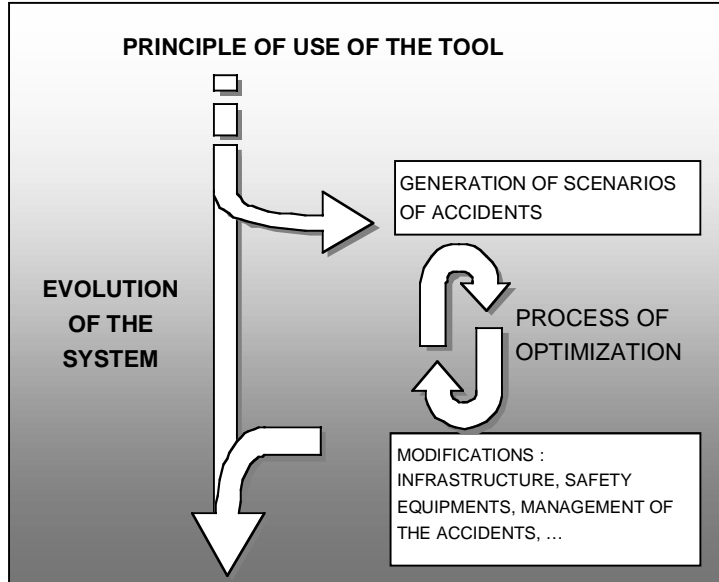


Figure 4 : Application principle of the new project tool

The principle of the proposed procedure, illustrated in figure 4, is an iterative method for guiding safety management. Accident scenari are generated on the basis of the description of a variant of the system (configuration, security equipment, etc.). An examination of the accident scenari produced by the simulation should allow the fine-tuning of the system towards an intrinsically more reliable configuration.

## Conclusion

In conclusion, four tunnel safety improvements are proposed:

- passenger self-help possibilities are of a capital importance and must be developed.
- information, communication and the training of the various persons involved must be improved.
- access to the accident site must be possible by a tunnel not affected by the accident
- there must be a separation between passenger and goods traffic.

The recent accident in the Mont-Blanc road tunnel, which has not yet been analysed, shows the importance of all the means mentioned above and, in a more general manner, of safety measures adapted to tunnels.