

Jean-Claude Déranlot
JCD Conseil
BP17
F-40991 ST PAUL LES DAX CEDEX

Téléphone : +33 (0)5 58 35 44 60
Mobile : +33 (0)6 15 01 21 87
E-mail : jcd-conseil@wanadoo.fr

SÉCURITÉ DES TUNNELS ROUTIERS
SAVOIR POUR RÉUSSIR LE PREMIER TUNNEL
INCITATION À L'ÉTUDE DE LA SÉCURITÉ DES POINTS SINGULIERS
D'UN RÉSEAU ROUTIER

Association Marocaine Permanente des Congrès de la Route
Congrès National de la Route,
OUARZAZATE (Maroc), 9 et 10 novembre 2006

Présentation

La sécurité des tunnels routiers impose l'étude de l'environnement naturel et de la sûreté de fonctionnement de ses équipements, comme pour tout autre ouvrage d'art. Cependant, le confinement amplifiant les effets d'un foyer, l'incendie est le risque le plus important qui mobilise une part importante des études de sécurité. Les conséquences potentielles sont aussi aggravées par les comportements des usagers qui, bien que théoriquement prévisibles, restent difficilement maîtrisables en phase d'urgence.

Température élevée, chemin de repli parfois inexistant, les sapeurs pompiers sont très concernés par l'intervention dans un tunnel : elle est toujours pénible et dangereuse si les procédures et les moyens n'ont pas été définis auparavant de manière cohérente.

Alors que de nombreux accidents, en France et en Europe, ont mis les tunnels au premier plan de l'actualité, le Maroc est encore peu concerné par ce type d'ouvrage. La présentation des méthodes d'étude de sécurité spécifiques aux tunnels est donc l'occasion de réfléchir à la nécessaire coopération entre les gestionnaires de réseaux routiers et les services de secours. Pourquoi et comment intégrer ces derniers dans un projet ?

Des enseignements peuvent ainsi être retenus pour l'amélioration des plans de secours en certains points singuliers du réseau. Un point est singulier soit par la nature de sa construction (pont, viaduc,...), soit par son environnement immédiat (voie très encaissée, zone exposée à des phénomènes naturels fréquents,).

-oOo-

Impossible de parler de premier tunnel sans avoir en mémoire le titre de l'ouvrage de l'Association mondiale de la Route qui est justement « Le premier tunnel »¹. Il y est écrit, page 8 : « *l'erreur commune fondamentale est de négliger la solution tunnel, jusqu'à ce que la conception d'un réseau routier soit allée trop loin pour pouvoir prendre en compte cette solution de façon optimale* ». À une époque où les tunnels sont particulièrement critiqués, cette citation reste certainement une vérité à retenir.

Le point de départ, c'est naturellement l'évaluation des besoins du réseau, la connaissance de la nature du trafic et de son évolution. Ensuite, les études terrains seront prises en compte par les ingénieurs du génie civil qui introduiront les contraintes des gabarits et des profils des voies de circulation. Des équipements seront définis et installés, puis le tunnel sera ouvert à la circulation. Cette progression, très schématique, a pour but de rappeler qu'il faut aussi, au plus tôt, définir de manière cohérente les moyens et l'organisation de sécurité, en accord avec les caractéristiques du tunnel et de son environnement. Le sujet est vaste, trop vaste pour un seul thème de conférence. L'exposé qui suit se concentre donc sur des points d'analyse qui nécessitent une grande coopération entre des équipes de spécialités et de cultures différentes, sachant que ces équipes ne sont pas toutes chez le maître d'ouvrage.

Certaines approches décrites dans les pages qui suivent peuvent être transposées à l'étude de points singuliers.

¹ Comité AIPCR des Tunnels routiers, **le premier tunnel routier**, AIPCR (Association Internationale Permanente des Congrès de la Route), Paris, 1995 (référence 05.01.B).

Table des matières

PRÉSENTATION	2
TABLE DES MATIÈRES	3
1. SOURCES D'INFORMATION	4
2. PRÉAMBULE.....	7
2.1. RÉFLEXIONS SUR LE THÈME DE LA SÉCURITÉ	7
2.1.1. <i>Obligation de moyens et de résultats.....</i>	7
2.1.2. <i>Accidents et anticipation</i>	7
2.1.3. <i>Coordination et synergie entre acteurs</i>	7
2.1.4. <i>Sécurité des personnes</i>	8
2.1.5. <i>Sécurité des biens.....</i>	8
2.1.6. <i>Protection de l'environnement</i>	8
2.1.7. <i>Sécurité de l'information.....</i>	8
2.1.8. <i>Sécurité informatique</i>	8
2.1.9. <i>Risques naturels</i>	9
2.1.10. <i>Malveillance et terrorisme</i>	9
2.2. ÉLÉMENTS POUR LA SÉCURITÉ DES TUNNELS ROUTIERS.....	9
2.2.1. <i>Les véhicules à l'arrêt.....</i>	9
2.2.2. <i>Les usagers.....</i>	10
2.2.3. <i>L'incendie</i>	10
2.2.4. <i>Sûreté de fonctionnement</i>	11
2.3. LA DÉTECTION AUTOMATIQUE D'INCIDENT	12
3. L'ANALYSE FONCTIONNELLE DE LA SÉCURITÉ.....	13
3.1. INTÉRÊT D'UNE ANALYSE FONCTIONNELLE	13
3.2. LIEN ENTRE ANALYSE FONCTIONNELLE ET RÉGLEMENTATION.....	13
3.3. COMMENTAIRE DES FONCTIONS.....	13
3.4. INTÉRÊT OPÉRATIONNEL	18
4. L'ANALYSE DES SCÉNARIOS	19
4.1. CRITIQUE DE LA PRATIQUE HABITUELLE DE L'ANALYSE DE SCÉNARIOS.....	19
4.2. OBJECTIF DE L'ANALYSE DES SCÉNARIOS	19
4.3. INCENDIES DE RÉFÉRENCE, MODÉLISATIONS	22
4.4. LA PRISE EN COMPTE DES DÉFAILLANCES	23
4.4.1. <i>Ventilation et désenfumage</i>	23
4.4.2. <i>Résistance, comportement au feu et cloisonnement</i>	24
4.4.3. <i>Éclairage, balisage et signalétique</i>	24
4.4.4. <i>Gestion des informations, détections, alarmes.....</i>	24
4.4.5. <i>Énergie.....</i>	24
4.4.6. <i>Communications.....</i>	24
4.4.7. <i>Gestion du trafic.....</i>	25
4.4.8. <i>Lutte contre l'incendie et accès des secours</i>	25
4.4.9. <i>PCS (Poste Central de Sécurité)</i>	25
4.5. COMPORTEMENTS ET FACTEUR HUMAIN	26
4.5.1. <i>Les usagers.....</i>	26
4.5.2. <i>Les opérateurs.....</i>	27
5. COMPLÉMENTS	29
5.1. LE RETOUR D'EXPÉRIENCE.....	29
5.1.1. <i>Intérêt du retour d'expérience.....</i>	29
5.1.2. <i>Critique du retour d'expérience.....</i>	29
5.1.3. <i>Analyse des incidents</i>	29
5.2. LES EXERCICES	30
5.3. QUELLE APPROCHE POUR LA SÉCURITÉ DU « SYSTÈME TUNNEL ».....	30

1. Sources d'information

En France l'incendie du tunnel du Mont Blanc a été le point de départ de nombreuses actions sur le thème de la sécurité des tunnels. Il a aussi été l'occasion d'une médiatisation de la sécurité des tunnels qui n'a pas toujours permis de traiter les problèmes avec la sérénité souhaitable.

L'Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques du Parlement a alors décidé de faire une évaluation du niveau de sécurité des tunnels français. Ce rapport sur « les moyens nécessaires à mettre en œuvre pour améliorer la sécurité des tunnels routiers et ferroviaires français », dit « rapport KERT », du nom du Député rapporteur, est toujours accessible sur le Web ². Il liste tous les tunnels du territoire français, commente leur état et identifie les problèmes de sécurité. À l'époque, c'était probablement le seul dossier, facilement accessible pour le non spécialiste, rassemblant autant d'informations sur le sujet. Le « rapport KERT » a eu un impact médiatique considérable et son existence ne pouvait laisser indifférent : c'est la conclusion d'une procédure de contrôle démocratique.

Cette action ne se substituait pas aux prérogatives de l'administration et « *Immédiatement après l'incendie du tunnel du Mont-Blanc, une enquête technique et administrative a été engagée sur les 39 tunnels routiers français de plus d'un kilomètre. Un diagnostic a été établi par un comité d'évaluation constitué, au niveau national, d'experts de l'administration et d'organismes extérieurs.*

Ce diagnostic, achevé au mois de juillet 1999, a été communiqué immédiatement aux maîtres d'ouvrage des tunnels concernés pour qu'ils prennent rapidement des mesures de renforcement de la sécurité en complément des mesures spécifiques à leur ouvrage. »

Le diagnostic est disponible à l'adresse :

<http://www.routes.equipement.gouv.fr/RoutesenFrance/liens/tunnels.PDF#search=%22diagnostic%20tunnels%22>

La circulaire interministérielle³ n°2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels routiers du réseau national a été publiée au Bulletin Officiel de septembre 2000.

Son annexe 1 définit la « procédure préalable à la mise en service des tunnels du réseau routier national » et les « modalités de suivi de leur exploitation ». L'annexe 2 est une « instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers (conception et exploitation) ».

L'instruction technique « *a pour objet de définir les dispositions de sécurité à prendre dans les nouveaux tunnels routiers afin de permettre la protection et l'évacuation des usagers et l'intervention des services de secours en cas d'incendie ou d'accident, ainsi que de limiter les conséquences d'un tel événement. On désigne ici par incident ou accident tout fait dû à une cause aléatoire, susceptible de mettre en danger les utilisateurs du tunnel : incident affectant gravement les systèmes techniques du tunnel, accident de la route, incendie, libération de matières dangereuses, etc.* ».

² Rapport Assemblée Nationale n°2388, rapport Sénat n°337.

<http://www.assemblee-nationale.fr/rap-oecst/tunnels/r2388.asp>

³ Ministère de l'Intérieur et Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement.

Ce texte marque un grand progrès pour la sécurité des tunnels routiers et son annexe 2 est encore aujourd'hui la base de la réglementation, après le vote d'une loi sur la sécurité des infrastructures de transport.

Un dossier de sécurité doit être transmis au préfet. Il comprend, outre des éléments descriptifs du tunnel et de son exploitation, une « *étude spécifique des dangers décrivant les accidents, quelle que soit leur origine, susceptibles de se produire en phase d'exploitation ainsi que la nature et l'importance des conséquences éventuelles ; cette étude précise et justifie les mesures propres à réduire la probabilité que les accidents surviennent et leurs conséquences* ».

La circulaire ne s'appliquait qu'aux tunnels appartenant à l'État. Il est cependant évident, qu'en dehors de toute obligation légale, le niveau de sécurité qui découlait de son application ne pouvait laisser indifférent en cas d'accident dans un tunnel non soumis à la circulaire. Son existence créait donc une référence de risque « acceptable ».

Au niveau européen des règles d'uniformisation sont énoncées dans la directive 2004/54/CE du Parlement Européen et du Conseil du 29 avril 2004 concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels du réseau routier transeuropéen.

L'originalité de la directive est probablement dans ses exigences quant à l'organisation :

- Autorité administrative désignée (nationale, régionale ou locale).
- Organe de contrôle technique.
- Gestionnaire du tunnel, public ou privé (mais un tunnel un gestionnaire).
- Responsable de la sécurité indépendant, nommé par le gestionnaire du tunnel.

Mais sa plus grande originalité est probablement d'avoir instauré dans son article 6 la fonction d'Agent de sécurité :

1. Pour chaque tunnel, le gestionnaire du tunnel désigne un agent de sécurité qui doit être préalablement accepté par l'autorité administrative et qui coordonne toutes les mesures de prévention et de sauvegarde visant à assurer la sécurité des usagers et du personnel d'exploitation. L'agent de sécurité peut être un membre du personnel du tunnel ou des services d'intervention, est indépendant pour toutes les questions ayant trait à la sécurité dans les tunnels routiers et ne reçoit pas d'instructions d'un employeur sur ces questions. Un agent de sécurité peut assumer ses tâches et fonctions dans plusieurs tunnels d'une région donnée.

2. L'agent de sécurité assume les tâches/fonctions suivantes:

- a) assurer la coordination avec les services d'intervention et participer à l'Élaboration des schémas opérationnels;*
- b) participer à la planification, à l'exécution et à l'évaluation des interventions d'urgence.*

L'existence de ce regard indépendant est un progrès pour la prise en compte de la sécurité, la transposition en droit français est imminente. Comme pour la circulaire, alors que l'exigence d'un agent sécurité ne concerne que les tunnels du réseau transeuropéen, la directive crée une référence. En cas d'accident grave, les responsables d'un ouvrage devraient justifier que les bonnes mesures de coordination ont été prises.

La réglementation française concerne les ouvrages de plus de 300 mètres de longueur, alors que la directive européenne s'applique aux tunnels de plus de 500 mètres.

Le texte de la directive européenne est accessible à l'adresse suivante :

http://www.europa.eu.int/eur-lex/pri/fr/oj/dat/2004/l_201/l_20120040607fr00560076.pdf

Au niveau national, le C.E.S.T.R. (Comité d'Évaluation de la Sécurité des Tunnel Routiers) a été remplacé par le CNESOR (Commission Nationale d'Évaluation de la Sécurité des Ouvrages Routiers) dont la composition et les missions sont élargies par rapport au précédent comité.

La circulaire interministérielle n° 2006-20 du 29 mars 2006 relative à la sécurité des tunnels routiers d'une longueur supérieure à 300 mètres fait le point sur le dispositif réglementaire des tunnels routiers :

<http://www2.equipement.gouv.fr/bulletinofficiel/fiches/Bo20067/A0070042.htm>

Pour se tenir informé des dispositions techniques et réglementaires relatives aux tunnels routiers, le site incontournable est celui du CETU (Centre d'Études des Tunnel) :

<http://www.cetu.equipement.gouv.fr>

D'autres organismes sont aussi particulièrement compétents :

L'Association Mondiale de la Route :

<http://www.piarc.org/fr>

dont le comité C.3.3 est chargé de l'exploitation des tunnels routiers. Ses enjeux sont les suivants :

- Enjeu 3.3.1 - Fournir une infrastructure de tunnel plus sûre
- Enjeu 3.3.2 - Améliorer l'exploitation et l'entretien des tunnels
- Enjeu 3.3.3 - Ventilation et extinction des incendies
- Enjeu 3.3.4 - Tenir compte des facteurs humains dans la sécurité des tunnels

L'Association Internationale des Travaux en Souterrains (AITES) :

<http://www.ita-aites.org/cms>

Association Française des Tunnel et de l'Espace Souterrain (AFTES) :

<http://www.aftes.asso.fr>

FIT (Fire in Tunnels)

<http://www.etnfit.net>

Des recherches sur le Web conduisent naturellement à d'autres sites intéressants, contenant de nombreuses informations relatives à la description des ouvrages, aux moyens techniques ainsi qu'à des recherches scientifiques.

Le lecteur est invité à se reporter à toutes ces sources disponibles, le présent exposé n'ayant qu'un but de sensibilisation sur le problème de la sécurité des tunnels routiers en privilégiant les aspects opérationnels.

2. Préambule

2.1. *Réflexions sur le thème de la sécurité*

Les tunnels routiers sont des ouvrages d'art bien spécifiques : intégrés à un réseau dont ils conservent les caractéristiques de trafic, le confinement augmente les risques au point de provoquer parfois des accidents graves ressentis comme de véritables catastrophes, même si le nombre de victimes reste dans des moyennes bien inférieures à celles des accidents liés à d'autres moyens de transport.

La sécurité, tout le monde en parle et reconnaît son importance, mais les divergences sont plus nombreuses que les accords dès qu'il s'agit de la définir ou de définir le niveau de sécurité acceptable d'un système.

Cette remarque est vraie pour les tunnels routiers dont l'évaluation et l'acceptation de la sécurité dépassent largement le cadre des études purement techniques.

2.1.1. *Obligation de moyens et de résultats*

La sécurité des tunnels routiers repose en partie sur des obligations de moyens⁴, mais elle exige aussi des analyses qui participent à la satisfaction d'une obligation de résultat. Si le niveau de risque n'est cependant pas défini en terme d'objectifs explicites, la possibilité qui est offerte de remplacer une disposition technique par une autre qui serait équivalente semble bien proche d'une démarche d'obligation de résultat.⁵

2.1.2. *Accidents et anticipation*

C'est bien le nombre d'accidents qui a déclenché une évolution de la réglementation des tunnels routiers. Potentiellement, ces accidents « existaient » déjà avant leur réalisation⁶, dans la mesure où les analyses de sécurité n'étaient pas poussées aussi loin que les méthodes disponibles l'auraient permis⁷.

Le tunnel est aussi un bon exemple de lieu dont la sécurité est ressentie en fonction des peurs et des craintes. C'est une bonne raison de traiter la sécurité de ce type d'ouvrage avec la plus grande rigueur.

2.1.3. *Coordination et synergie entre acteurs*

La sécurité des tunnels doit être obtenue en déjouant les pièges de la « sectorisation ». C'est valable pour les tunnels reliant deux états, mais à l'intérieur d'un état de nombreux tunnels relient des collectivités territoriales qui ont leur propre autonomie de gestion. Le processus conduisant à l'autorisation d'exploiter, en s'appuyant sur des méthodes de travail adaptées, favorise la coopération au sein d'un véritable projet commun d'étude globale de la sécurité.

⁴ La réglementation française est souvent sous-entendue dans le présent document ce qui impose une adaptation au système de droit de chaque État concerné.

⁵ Annexe II à la circulaire interministérielle 2000-63 du 25 août 2000.

⁶ Comme les maladies, les accidents ont leur « période d'incubation ».

⁷ Ces méthodes datent des années 70 (grands programmes missiles, aéronautique, espace, nucléaire).

2.1.4. Sécurité des personnes

La réglementation relative aux tunnels routiers concerne la sécurité des usagers et des personnels des services de secours. Le personnel d'exploitation est naturellement concerné par la sécurité des usagers, mais – et il semble que les démarches soient encore insuffisantes dans ce domaine – la sécurité du travail implique une analyse détaillée de l'exposition aux risques professionnels⁸. Parmi ces risques, certains sont liés à l'environnement post accidentel et il est impossible de prendre une décision d'organisation des secours de l'exploitant sans une étude poussée du poste de travail correspondant.

2.1.5. Sécurité des biens

Dans les tunnels routiers, la sécurité des biens c'est la sécurité de l'ouvrage et de ses équipements⁹. Les performances exigées ont pour objectif de garantir la sécurité des personnes pendant le temps nécessaire à leur mise en sécurité.

La sécurité de l'ouvrage est une responsabilité de l'exploitant. Cependant la remise à disposition d'un ouvrage en bon état étant une clause générale des concessions, l'exploitant a intérêt à veiller à la pérennité de l'ouvrage.

2.1.6. Protection de l'environnement

Un minimum de précaution est à prendre pour protéger l'environnement à proximité d'un tunnel routier en service courant, en phase travaux et en situation accidentelle (récupération des eaux polluées par exemple, rejet de ventilation ou de désenfumage,...). La sécurité s'intéresse surtout aux atteintes à l'environnement qui surviennent à l'occasion d'un accident.

2.1.7. Sécurité de l'information

La sécurité des tunnels impose de protéger certaines informations lorsque leur divulgation faciliterait l'identification des points critiques pour commettre un acte malveillant aux conséquences graves. La sécurité de l'information est un thème plus vaste que la sécurité informatique.

2.1.8. Sécurité informatique

Cette sécurité doit faire l'objet d'une attention particulière car tout poste de contrôle fonctionne avec des moyens informatiques. Elle concerne les matériels, les logiciels (bogues), la continuité de fonctionnement, la protection contre les virus (même si le système est apparemment isolé de tout réseau extérieur). L'ergonomie des interfaces mérite une attention particulière.

⁸ En France, il est obligatoire de disposer d'un « document unique » qui comporte un inventaire des risques de chaque unité d travail avec les mesures de prévention associées.

⁹ Au-delà des exigences d'intégrité et de performances pour la sécurité des personnes.

2.1.9. Risques naturels

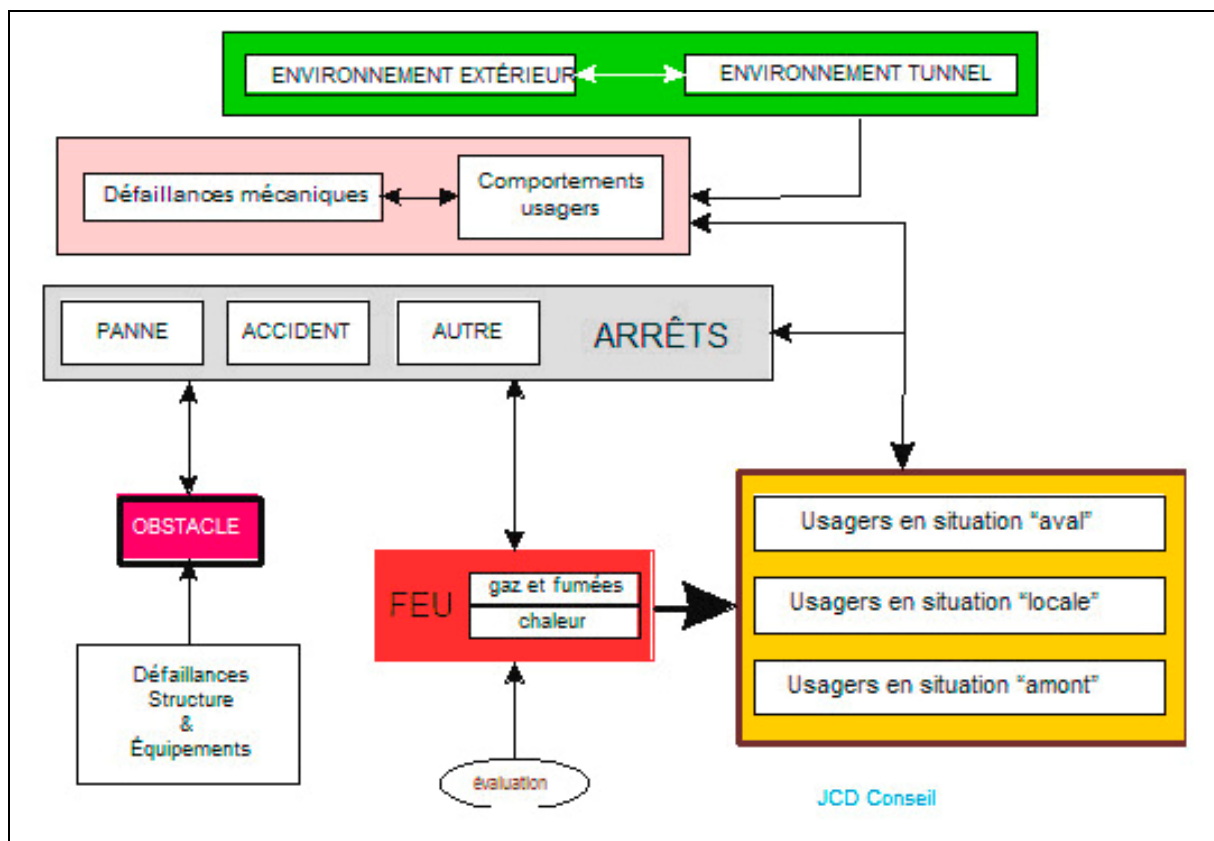
Au-delà du risque naturel majeur, les causes naturelles doivent être étudiées en détail comme facteur de perturbation des procédures de sécurité¹⁰ de l'ouvrage ou de l'environnement de fonctionnement spécifié pour les équipements.

2.1.10. Malveillance et terrorisme

Les équipements vitaux d'un tunnel routier doivent être protégés des actes de vandalisme « trop faciles ». Les conséquences d'actes de terrorisme, non dimensionnantes, sont étudiées et régulièrement actualisées (motivations et intérêt d'une action contre l'ouvrage, conséquences potentielles, réactions opérationnelles, impact sur la pérennité de l'ouvrage).

2.2. Éléments pour la sécurité des tunnels routiers

Le schéma ci-dessous résume les points importants d'étude de la sécurité d'un tunnel routier, en particulier en ce qui concerne le risque incendie puisqu'il met en évidence les différentes causes d'occurrence du feu et d'aggravation possible des conséquences.



2.2.1. Les véhicules à l'arrêt

Les arrêts peuvent être provoqués par des pannes, des accidents, ou être la conséquence du comportement individuel des usagers.

¹⁰ À traiter dans l'analyse des scénarios. La géologie est traitée au moment de la conception du l'ouvrage et aura souvent une influence sur le tracé de l'ouvrage et le génie civil (contraintes par exemple).

Le comportement des usagers est conditionné par la perception de l'environnement du tunnel et les éventuelles défaillances mécaniques du véhicule, mais aussi par l'état psychologique au moment de l'incident.

L'environnement du tunnel doit favoriser le choix des bons comportements de la part des usagers (éclairage, signalétique, etc.), il doit aussi permettre l'évacuation dans de bonnes conditions en cas de feu (désenfumage). L'environnement extérieur peut aussi agir sur l'environnement du tunnel (cas des conditions atmosphériques défavorables pour le désenfumage), ou le comportement des usagers (variation trop importante d'éclairage).

L'arrêt peut aussi être provoqué par un obstacle tel que la chute d'un équipement ou d'un élément de structure, la chute d'un chargement transporté par un autre véhicule.

2.2.2. Les usagers

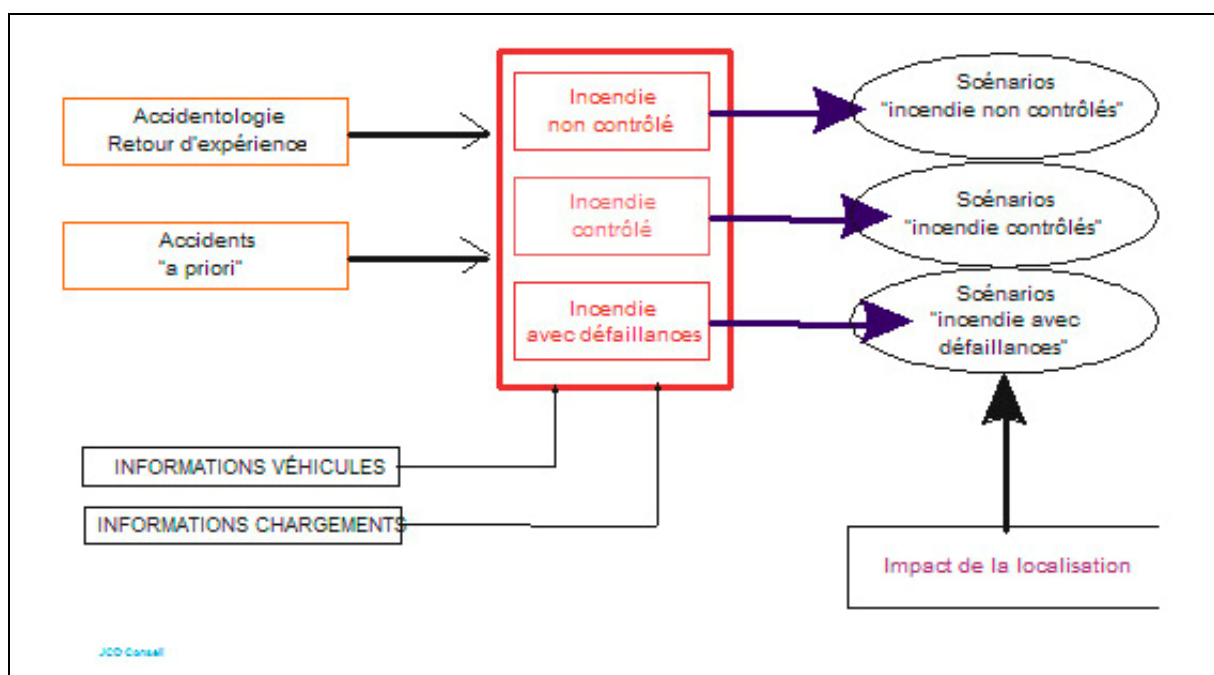
Dans un tunnel unidirectionnel, les usagers peuvent être répartis en trois classes: usagers en « situation aval », usagers en « situation locale », usagers en « situation amont ». Les usagers en « situation locale » sont ceux qui sont à proximité immédiate de l'incendie ou impliqués dans un accident. Généralement, les usagers en « situation aval » évacuent le tunnel avec leur véhicule. Les usagers en « situation amont » sont supposés bloqués par l'accident, ou par le bouchon faisant suite à la suppression d'une voie de circulation, voire de la seule voie existant.

Dans un tunnel bidirectionnel, la même répartition est valable si un courant d'air orienté est établi. Dans le cas contraire, on ne retiendra qu'une distinction entre les usagers en situation locale et les usagers éloignés (conséquences sur la santé et les comportements en fonction des perceptions).

2.2.3. L'incendie

Le feu est caractérisé par l'effet des gaz et fumées ainsi que de la chaleur.

L'accidentologie est traitée à partir du retour d'expérience et des statistiques. Elle permet d'estimer des probabilités d'occurrence pour les événements initiateurs (incendies spontanés, accidents) dans le tunnel.



L'incendie le plus critique est un feu de camion. Les incendies d'autocar peuvent être, au niveau de la puissance, du même ordre de grandeur que les incendies de camions, le nombre d'usagers augmentant la gravité potentielle de l'accident¹¹.

La description de l'incendie non contrôlé est souvent proposée à partir des sources ouvertes de la bibliographie traitant de ce sujet. Les accidents ou les essais se sont naturellement déroulés dans un environnement totalement différent de celui du tunnel étudié : hauteur, ventilation, ... La transposition est donc nécessairement une description grossière du phénomène, mais, en dehors d'une modélisation « précise » (et souvent non justifiée), c'est généralement la seule solution pour décrire l'évolution d'un sinistre.

L'incendie contrôlé est celui qui est traité avec les moyens de lutte adaptés, dans les délais correspondants aux temps de réaction propres au tunnel et à son organisation. L'objectif du contrôle de l'incendie est d'en limiter les effets afin d'éviter toute aggravation catastrophique. L'incendie avec défaillances est un incendie dont le contrôle est perturbé par des défaillances d'équipements, ou des défaillances de l'organisation. Les conséquences prévisibles d'un incendie avec défaillances devraient se situer entre les conséquences de l'incendie non contrôlé et celles de l'incendie contrôlé.

La puissance des incendies est fonction des véhicules et de leur chargement. La présence de matières dangereuses¹² est naturellement un facteur aggravant, il importe donc que les procédures conduisent à une identification rapide du type de véhicule puis de la nature du chargement.

Des véhicules de tourisme ou des utilitaires peuvent aussi transporter des produits dangereux (peintures et solvants, bouteilles de gaz). Les accidents récents, le dernier en date étant celui du tunnel du Fréjus, posent le problème des camions dont la charge n'est pas soumise à la réglementation T.M.D. alors qu'elle est particulièrement dangereuse dans l'environnement d'un tunnel (chaleur produite, densité des fumées).

La position des incendies dans le tunnel modifie de nombreux paramètres à prendre en compte pour le désenfumage, l'accès des secours, ou encore pour apprécier le comportement des usagers. Devant le nombre important de situations possibles, le raisonnement doit s'appuyer sur des situations pénalisantes ou sur des « scénarios génériques ». Une réflexion complémentaire permet ensuite d'apprécier l'impact de la localisation de l'incendie sur le bon déroulement d'un scénario¹³.

2.2.4. Sûreté de fonctionnement

L'exploitation et la sécurité d'un grand tunnel reposent sur de nombreux équipements techniques qui justifient une analyse de la sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, causes communes de défaillance, défaillances de mode commun, niveau de redondance, ...).

¹¹ L'effectif des passagers d'un autocar peut conduire à la saturation d'un abri.

¹² Au sens réglementaire T.M.D., que ce transport soit autorisé ou non dans l'ouvrage. En France, l'autorisation ou le refus de transit T.M.D. sont décidés après comparaison du risque tunnel avec celui d'un itinéraire alternatif.

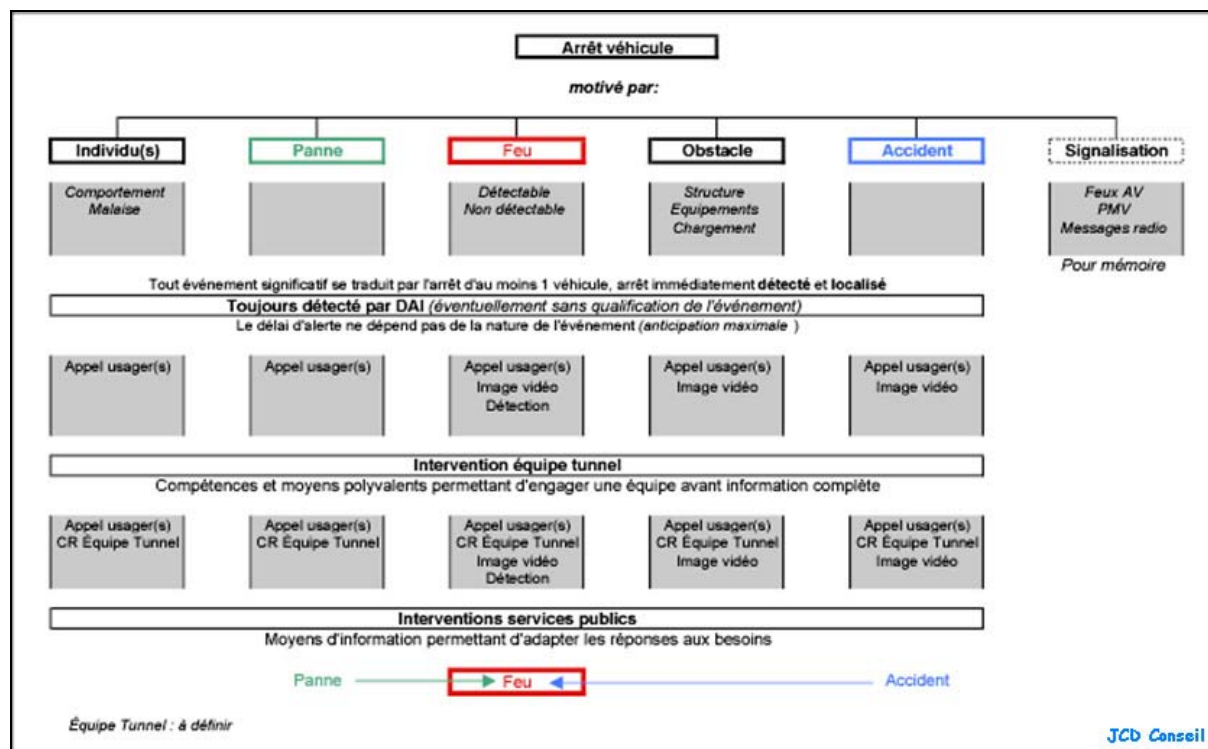
¹³ Il y a parfois des erreurs de localisation du véhicule en feu (en l'absence de D.A.I.).

2.3. La détection automatique d'incident

Incontestablement, la détection automatique d'incident (D.A.I.) tient une place de plus en plus importante dans la sécurité des tunnels routiers car elle autorise une réaction particulièrement précoce.

Le schéma suivant illustre son intérêt pour réduire les délais d'intervention. Tous les incidents significatifs sur un véhicule se traduisent en effet par l'arrêt de ce dernier. En quelques secondes l'agent de permanence au PC de sécurité est informé de l'arrêt. Souvent une fumée suffisamment opaque déclenchera une alarme.

Il y a ainsi anticipation sur l'intervention, la nature de l'accident étant recherchée au plus tôt.



3. L'analyse fonctionnelle de la sécurité

Il est souhaitable de procéder à une analyse fonctionnelle spécifique à la sécurité d'un tunnel afin de mieux identifier les vrais problèmes par rapport à des objectifs bien définis. Cette analyse fonctionnelle se recoupe avec l'organigramme technique de l'ouvrage.

3.1. Intérêt d'une analyse fonctionnelle

Il est évident que les différentes fonctions énoncées ne sont pas indépendantes. Un même équipement, une même procédure, peuvent participer à plusieurs fonctions. Une fonction secondaire donnée peut contribuer à la satisfaction d'une autre fonction. L'intérêt de l'analyse fonctionnelle « sécurité des usagers » est triple :

- Vérifier que l'organisation fait face aux situations accidentelles en utilisant des équipements dont les performances ont été démontrées.
- Par un découpage fonctionnel indépendant de celui de la conception, offrir une meilleure garantie d'atteinte des objectifs de sécurité visés. Les points nécessitant des améliorations sont ainsi clairement identifiés.
- En conclusion de l'étude, faciliter l'expression d'un **bilan sécurité**, sous une forme qui facilite la communication avec des correspondants qui ne sont pas nécessairement des techniciens.

3.2. Lien entre analyse fonctionnelle et réglementation

J'avais proposé cette analyse fonctionnelle après la publication de l'instruction technique annexée à la circulaire interministérielle du 25 août 2000 qui permet d'identifier 4 grandes fonctions de sécurité :

- **F1 - Assurer la prévention¹⁴ des accidents,**
- **F2 - Permettre l'évacuation des usagers,**
- **F3 - Permettre l'intervention des secours,**
- **F4 - Limiter les conséquences des événements accidentels.**

3.3. Commentaire des fonctions

Il s'agit de juger de la sécurité d'après des fonctions qui correspondent aussi à un ensemble d'objectifs cohérents. Les fonctions principales sont décomposables en fonctions secondaires, en veillant cependant à ce que ces dernières ne soient pas trop nombreuses (voir tableau page suivante).

Les équipements peuvent être associés à une ou plusieurs fonctions, l'impact de la défaillance des équipements se traduit par une perte totale ou partielle de fonction(s).

¹⁴ La reprise exacte des termes de l'instruction technique conduirait à mettre ici le mot « protection », mais la protection est en fait assurée par les autres fonctions.

L'analyse fonctionnelle de la sécurité

F1 : assurer la prévention des accidents

- F1.1 Limiter la probabilité des événements du domaine maîtrisable**
- F1.2 Limiter la probabilité des événements du domaine non maîtrisable**

F2 : Permettre l'évacuation des usagers

- F2.1 Garantir un itinéraire d'évacuation utilisable par les usagers**
- F2.2 Garantir un environnement physique compatible avec la présence des usagers**
- F2.3 Garantir la permanence de l'information (montante et descendante)**
- F2.4 Assurer l'accompagnement des usagers**
- F2.5 Assurer le recueil des usagers**

F3 : Permettre l'intervention des services de secours

- F3.1 Garantir la transmission de l'alerte**
- F3.2 Garantir un accès au lieu de l'accident**
- F3.3 Offrir un environnement de travail**
- F3.4 Garantir la permanence des communications**
- F3.5 Assurer la sécurité des équipes de secours**

F4 : limiter les conséquences des événements accidentels

- F4.1 Éviter un sur-accident**
- F4.2 Limiter le niveau d'intensité**
- F4.3 Limiter l'étendue spatiale**
- F4.4 Limiter la durée**

JCD Conseil

F1 : assurer la prévention des accidents

La distinction entre « domaine maîtrisable » et « domaine non maîtrisable » ouvre la discussion sur le comportement des usagers en situation accidentelle. Il est évident que ce comportement ne se prescrit pas, il est seulement possible (et obligatoire) de mettre en place les moyens qui permettent aux usagers d'adopter majoritairement le bon comportement¹⁵.

F1.1 Limiter la probabilité des événements du domaine maîtrisable

Objectif : prévention « classique ».

Le bon fonctionnement des équipements et de l'organisation est sous la responsabilité directe de l'exploitant qui conserve un grand pouvoir d'action pour atteindre ses objectifs (maîtrise par maintenance, formation, etc.).

F1.2 Limiter la probabilité des événements du domaine non maîtrisable

Objectif : mettre en place les conditions d'une réduction de la probabilité des événements redoutés, suivant des règles reconnues (l'obligation de résultat est moins forte que pour F1.1). Exemple : mesures destinées à modifier le comportement des usagers, après ou avant un accident (Affectation des voies de circulation, signalétique d'évacuation,...).

L'obligation de sécurité est ici plus une obligation de moyens qu'une obligation de résultat, contrairement au cas de F11 où l'obligation de résultat est dominante. Il n'existe pas de méthodes permettant de garantir à 100% qu'un individu ou un groupe adoptera la bonne attitude face à un événement stressant, hors du commun.

F2 : Permettre l'évacuation des usagers

F2.1 Garantir un itinéraire d'évacuation utilisable par les usagers

Ces cheminements sont utilisables en situation accidentelle, avec ou sans assistance.

Après l'incendie du tunnel du Mont Blanc des gaines d'air frais sont utilisées pour l'évacuation dans des conditions qui, bien que peu confortables, offrent une option susceptible de sauver des vies.

Dans les tunnels plus récents, le chemin d'évacuation est inclus dans la conception de l'ouvrage (accès au deuxième tube pour les tunnels bitubes ou à accès à une galerie de service).

F2.2 Garantir un environnement physique compatible avec la présence des usagers

Les environnements sont compatibles avec la présence des usagers dans la situation accidentelle considérée (air respirable, température, visibilité, ...).

Cet environnement est garanti par la ventilation et l'éclairage, la séparation coupe-feu entre tubes, galeries ou à l'entrée des abris.

¹⁵ En tenant compte de l'état des connaissances sur les comportements, la communication et le stress.

F2.3 Garantir la permanence de l'information (montante et descendante)

La permanence du flux d'information suppose la disponibilité des moyens techniques de communication (émetteur, récepteur, ligne), mais aussi la compréhension des messages au point de réception. Par exemple, un message transmis par une sonorisation doit être compréhensible par les usagers dans l'environnement du lieu considéré.

Si l'importance de l'échange d'informations entre les usagers et le PC de sécurité est toujours reconnue, la saturation de l'opérateur qui a de nombreuses tâches à accomplir est souvent oubliée.

Outre une impossibilité d'action pour l'opérateur, une surcharge de travail peut avoir des conséquences graves sur le comportement des usagers qui seront inquiets du manque de réponse ou de la réception de réponses alarmantes (ton, stress transmis par la voix, vocabulaire inadapté,...).

F2.4 Assurer l'accompagnement des usagers

Dès que possible¹⁶, il faut disposer sur les lieux d'un accident d'un personnel compétent, et apte à accompagner les usagers en difficulté jusqu'au point de sortie, dans les délais impartis.

L'accompagnement ne doit pas être indispensable pour garantir la sécurité des usagers, dont certains auront toujours des comportements inadaptés.

Une telle mission suppose une bonne formation, y compris sur la psychologie de l'urgence au niveau individuel ou d'un groupe.

F2.5 Assurer le recueil des usagers

Les usagers évacués sont recueillis en des lieux adaptés à leur état ; certains sont situés dans l'emprise de la concession du tunnel.

La sortie du tunnel n'est qu'une première étape. Cette fonction assure le lien avec les plans de secours (zone de tri des blessés, assistance psychologique, isolement et accueil des proches des victimes,...).

F3 : Permettre l'intervention des services de secours

F3.1 : Garantir la transmission de l'alerte

Dans les différentes situations accidentelles, il doit toujours être possible de transmettre l'alarme, en tenant compte des conséquences immédiates de l'événement redouté (redondance des moyens de transmission, secours électrique des installations) puis de retransmettre l'alerte vers les services de secours.

Disposer de lignes téléphoniques différentes à chaque portail d'un tunnel participe à la satisfaction de cette fonction.

F3.2 : Garantir un accès au lieu de l'accident

Les équipes de l'exploitant et des services publics doivent pouvoir atteindre l'accident.

¹⁶ Le temps « au plus tôt » est à identifier dans l'analyse des scénarios.

Dans les tunnels urbains, la gestion de la fluidité du trafic est une obligation. Dans les tunnels bitubes possibilité d'utiliser l'espace trafic non sinistré, utilisation d'accès spéciaux. Ces dernières solutions augmentent les temps de mise en œuvre (longueur des parcours et fatigue du personnel).

La mise en œuvre du désenfumage qui entraîne un déplacement longitudinal de la fumée peut constituer une gêne majeure pour la progression des secours.

F3.3 : Offrir un environnement de travail

Les secours doivent mettre en œuvre efficacement des moyens adaptés aux situations accidentelles.

Participent à la satisfaction de cette fonction : une bonne répartition des prises d'eau, des prises électriques, un réseau de radiocommunication, des anneaux de manœuvre de force, le désenfumage¹⁷,...

F3.4 : Garantir la permanence des communications

Les équipes des services publics de secours restent localement en contact, peuvent communiquer avec les équipes opérationnelles de l'exploitant et avec leurs propres services extérieurs.

Il faut s'assurer de la permanence des communications spécifiées lors de la conception du tunnel, dans les hypothèses d'environnement de l'accident en précisant la durée de bon fonctionnement.

F3.5 : Assurer la sécurité des équipes de secours

Ne pas exposer les équipes de secours à un risque intolérable.

C'est l'occasion de vérifier la stabilité au feu des structures et des équipements en fonction du temps. Une panne d'équipement, système de désenfumage¹⁸ par exemple, peut entraîner un risque intolérable pour les équipes de secours.

F4 : Limiter les conséquences des événements accidentels

F4.1 : Éviter un sur-accident

L'accident en cours de traitement ne doit pas être la cause d'un nouvel accident, comme c'est trop souvent le cas sur les autoroutes.

Exemples d'actions : détection immédiate des véhicules arrêtés, information des usagers en amont pour un tunnel à tube unique, de tous les usagers pour un tunnel à deux sens de circulation. Moyens disponibles : feux de signalisation, panneaux à messages variables, messages d'alerte transmis par radio, barrières automatiques d'arrêt.

¹⁷ Le désenfumage élimine les fumées, donc améliore la visibilité, mais il élimine aussi de la chaleur.

¹⁸ Ne pas oublier qu'il évacue la fumée mais aussi la chaleur.

F4.2 : Limiter le niveau d'intensité

Objectif : diminuer l'intensité des phénomènes agressifs associés aux événements redoutés, pour les personnes et les équipements.

Exemple : interdiction des matières dangereuses, limitation de vitesse, désenfumage. L'extinction est un moyen de limiter le niveau d'intensité d'un foyer, d'où un débat sur l'utilisation de moyens fixes d'extinction par brouillard d'eau.

Les mérites de ces moyens sont certains, mais avant de les adopter il est indispensable de faire une étude sérieuse pluridisciplinaire (capacité d'extinction dans l'environnement du tunnel, impact sur le comportement des usagers, toxicologie comparée,...)¹⁹.

F4.3 : Limiter l'étendue spatiale

Limiter l'étendue des conséquences au plus près de l'accident initial, ainsi qu'aux points éloignés.

La ventilation de désenfumage limite la propagation des fumées au delà des limites acceptables évaluées par des modélisations ; les séparations coupe feu limitent la propagation d'un incendie. Limiter l'étendue spatiale est aussi à prendre au sens de la sûreté de fonctionnement des équipements en répondant à la question : quelles sont les conséquences plus ou moins lointaines d'une défaillance locale suite à un accident ? (coupure d'un câble par exemple).

F4.4 Limiter la durée

Tout en s'assurant que les délais de réactions restent réalistes et adaptés aux circonstances, il faut faire un effort de réduction de tous les délais²⁰.

L'intervention précoce sur un incendie est une composante de la réduction totale de la durée de traitement de l'accident. La limite de durée est aussi un objectif d'exploitation, mais des contraintes d'enquête judiciaire peuvent interdire la réouverture au trafic.

3.4. Intérêt opérationnel

L'intérêt de l'analyse fonctionnelle de la sécurité ne se limite pas à l'exercice d'étude en amont de l'exploitation.

Bien conduite elle devrait pouvoir fournir des informations utiles pour gérer les interventions en indiquant le niveau des pertes de fonctions sécurité sur toute la longueur du tunnel à partir du temps t_0 de l'événement initial.

¹⁹ Sujet qui ne sera pas développé ici.

²⁰ À étudier avec l'analyse des scénarios.

4. L'analyse des scénarios

4.1. *Critique de la pratique habituelle de l'analyse de scénarios*

Nous avons tous entendu un jour qu'il n'y avait aucun problème de sécurité, car :

- Le personnel réagira en 5 minutes...
- Le désenfumage fonctionnera en 4 minutes...
- Le groupe électrogène démarrera en 3 secondes...
- Les pompiers arriveront en 20 minutes...
- ... (ici, place pour le retour d'expérience).

Combien d'analyse de scénarios repose ainsi sur des temps immuables, c'est-à-dire quasiment sans intérêt lorsque l'homme ou une organisation est en cause (facteur humain, comportements) ou que l'action dépend d'un environnement extérieur, qui, même lorsqu'il est bien connu, reste incertain quant à son état futur et aux conséquences de cet état sur la sécurité d'un tunnel.

Pire, on peut imaginer un expert proposant d'engager la responsabilité d'un exploitant ou d'un intervenant sur des temps précis mais utopiques. Pour être valable, un temps de référence doit être analysé sérieusement et l'analyse permet de définir les conditions de validité par rapport à des perturbations, surtout lorsqu'elles n'ont rien d'extraordinaire.

4.2. *Objectif de l'analyse des scénarios*

L'analyse des scénarios²¹ permet de :

- Décrire l'évolution des situations accidentelles²².
- Situer la répartition des actions dans le temps.
- Mettre en évidence le décalage qui peut exister entre les souhaits et les possibilités²³.
- Fournir une entrée pour la rédaction des procédures d'intervention.
- Situer la sécurité globale du « système tunnel »²⁴.

Outil de planification, c'est aussi un outil de communication et de coopération entre acteurs de compétences diverses.

L'analyse de scénarios d'accidents dans un tunnel routier informe sur la robustesse du système (technique + organisation + usagers + environnement).

C'est bien cette robustesse qui est essentielle pour l'évaluation de la sécurité. À quoi servirait un scénario qui se déroulerait toujours pour le mieux dans un monde irréel²⁵ sans le moindre

²¹ J'ai pour habitude d'employer le pluriel scénarios, réservant scenarii au domaine artistique.

²² Les scénarios sont : « un moyen de penser l'impensable (*thinking the unthinkable*), de stimuler l'imagination, tout en l'empêchant de s'égarer » (H.Kahn).

²³ L'étude des scénarios évalue le temps d'attente des usagers et de l'exploitant avant l'arrivée des secours extérieurs, temps qui est un critère d'évaluation de la cohérence des mesures de sécurité.

²⁴ Par système, il faut entendre l'ensemble du tunnel et de ses équipements, des moyens humains et, dans certains cas, des services publics susceptibles d'intervenir.

imprévu, sans la moindre défaillance. À croire que les accidents ne sont que des productions d'imaginaires débordantes.

Suivant les besoins, un scénario est associé à l'étude des causes d'une situation, des causes potentielles d'aggravation de cette situation, des conséquences réelles ou potentielles des événements.

En appréciant la sensibilité aux défaillances, l'étude des scénarios identifie les fonctions qualifiées de « fonctions importantes pour la sécurité ». Les pertes de fonction peuvent s'exprimer sous une forme qui privilégie la fonction (perte d'énergie, perte de ventilation, perte de redondance) ou s'exprimer sous une forme plus concrète : perte d'un équipement donné.

Dans le cadre de l'étude de la sécurité d'un tunnel routier, un scénario :

- se déroule dans l'espace (Où ? En quels lieux),
- se déroule dans le temps (Quand ? Pendant combien de temps ?).
- nécessite la mise en œuvre d'équipements, à partir d'une configuration initiale donnée,
- suppose la description précise d'une situation de départ (moyens techniques et humains, environnement),
- prend en compte les comportements des usagers et la charge de travail des opérateurs,
- tient compte de l'intervention des services publics.

Tout scénario possède une dynamique propre qui peut être modifiée par des événements perturbateurs. Les variantes qui en découlent sont identifiées et étudiées en détail si elles sont pertinentes.

Les scénarios à étudier sont obtenus à partir :

- des listes d'accidents établies par des groupes d'étude,
- de la recherche des atteintes à l'intégrité des usagers (mort ou blessure) par défaillance de la structure du tunnel ou de ses équipements,
- du retour d'expérience des accidents en tunnels routiers et sur autoroute (un accident donné fait l'objet d'une étude déductive et inductive),
- des modifications locales d'environnements (physique, socio-économique).

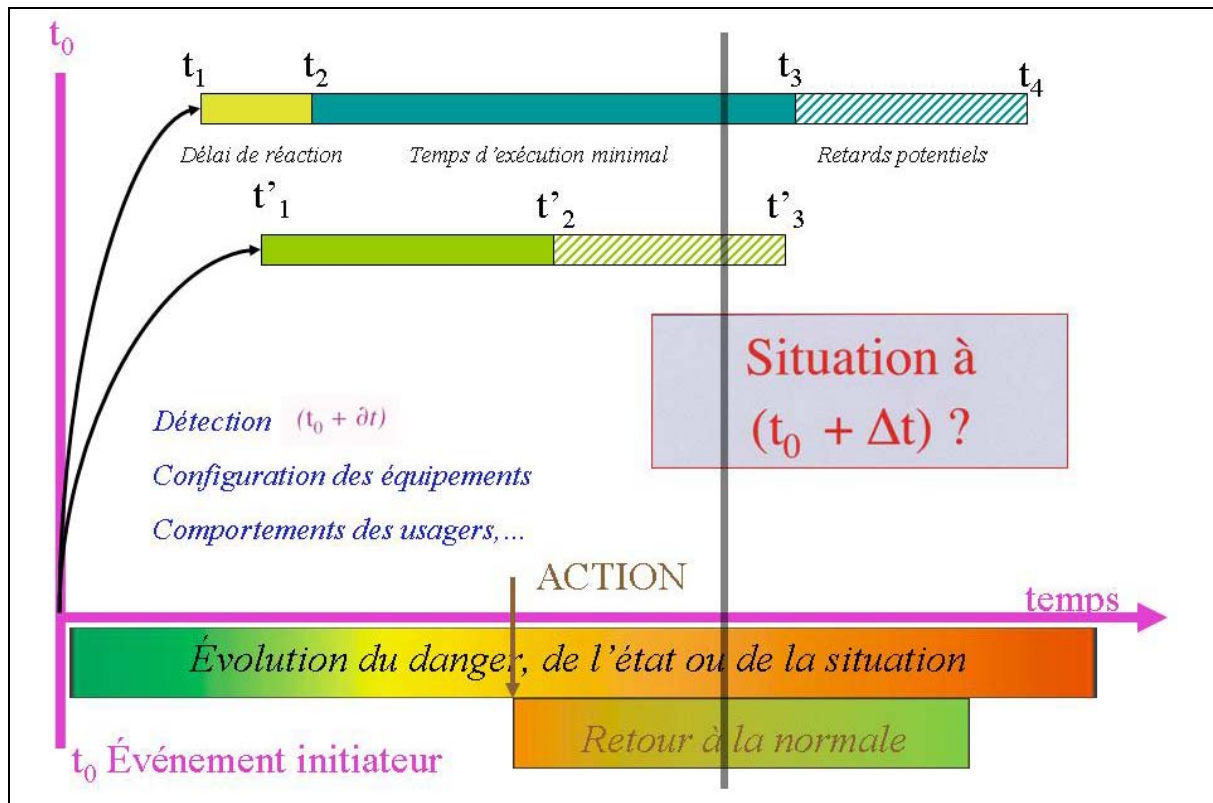
La description du scénario comprend :

- l'analyse des potentialités de défaillances (moyens techniques et organisation),
- l'identification des situations dégradées acceptables,
- le rappel des mesures existantes,
- les mesures particulières ou générales de prévention et de maîtrise (points clés),
- l'aide à l'évaluation d'acceptabilité du risque (résultat d'une concertation),
- les informations à utiliser pour l'identification opérationnelle d'un niveau de scénario.

²⁵ Il faut avoir le sens des ordres de grandeur et ne pas donner des temps avec une précision de la seconde lorsqu'il s'agit d'un temps d'évacuation estimé. Cette remarque n'est pas valable pour des dispositifs techniques.

Pour l'étude spécifique de dangers (E.S.D.), l'étude d'un scénario est normalement achevée quand les usagers (valides ou non) sont sortis du tunnel²⁶ ; il est utile de la poursuivre au-delà pour obtenir suffisamment d'informations sur la robustesse et les conditions de désengagement des services de secours²⁷.

Représentation des scénarios



L'origine des temps t_0 correspond à l'instant où l'événement perturbateur se produit. Cet instant sera souvent inconnu, s'il n'émet que des « signaux faibles ». L'amélioration de la sécurité exige de rechercher les meilleurs moyens de détection sans oublier que l'alerte doit rester crédible²⁸.

Les barres horizontales représentent les différentes actions techniques et humaines, ces actions sont liées par des lignes de transmission de l'information.

Les points de décision importants peuvent être reportés sur le graphe, afin de s'assurer que les informations nécessaires à la prise de décision sont effectivement disponibles. La collecte et le traitement de ces informations doivent être intégrés dans l'analyse de scénario qui oublie trop facilement l'ambiguïté de certaines informations (localisation, nature de l'événement). Le retour d'expérience montre la réalité de telles ambiguïtés.

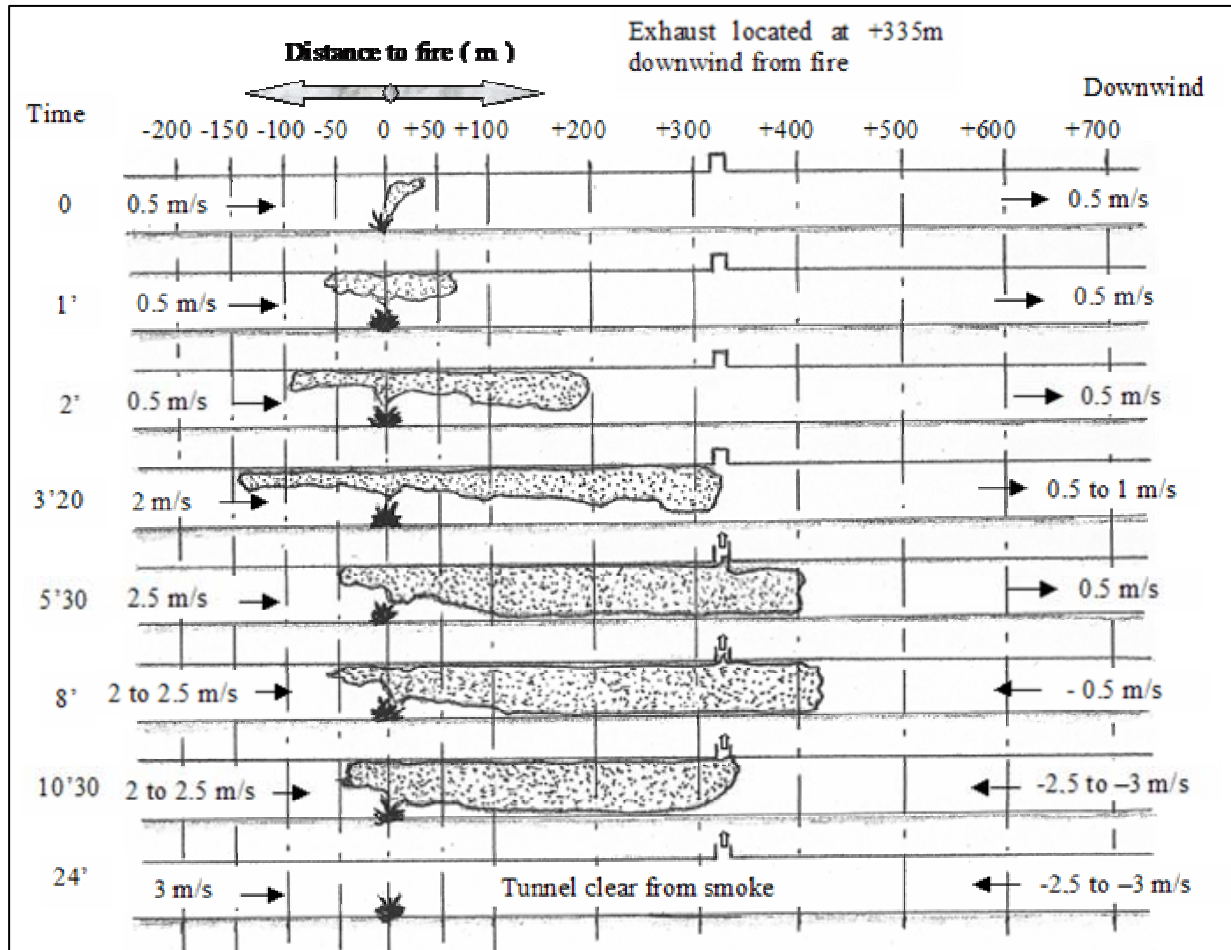
²⁶ Rappel : l'objectif de l'ESD est uniquement la sécurité des personnes. La pérennité de l'ouvrage (exploitation) relève d'une autre démarche.

²⁷ Des scénarios de remise en service peuvent également être utiles.

²⁸ Sensibilité du détecteur à l'environnement tunnel, en particulier pour la détection incendie.

L'évolution du danger, de l'état ou de la situation est décrite²⁹. Cette description repose par exemple sur les modélisations de mouvement des fumées, d'évolution de la température, de la visibilité, des concentrations en gaz toxiques.

Le schéma ci-dessous donne un exemple de représentation de l'effet du désenfumage sur le mouvement des fumées³⁰.



4.3. Incendies de référence, modélisations

Pour faire des études qui permettent des comparaisons, il est important de disposer de références communes aux incendies de véhicules qui sont très diversifiés. Le dossier E.S.D. du CETU liste les principaux types de foyers à retenir en fonction du trafic d'un tunnel, deux exemples de variation de puissance sont donnés dans les graphiques ci-dessous.

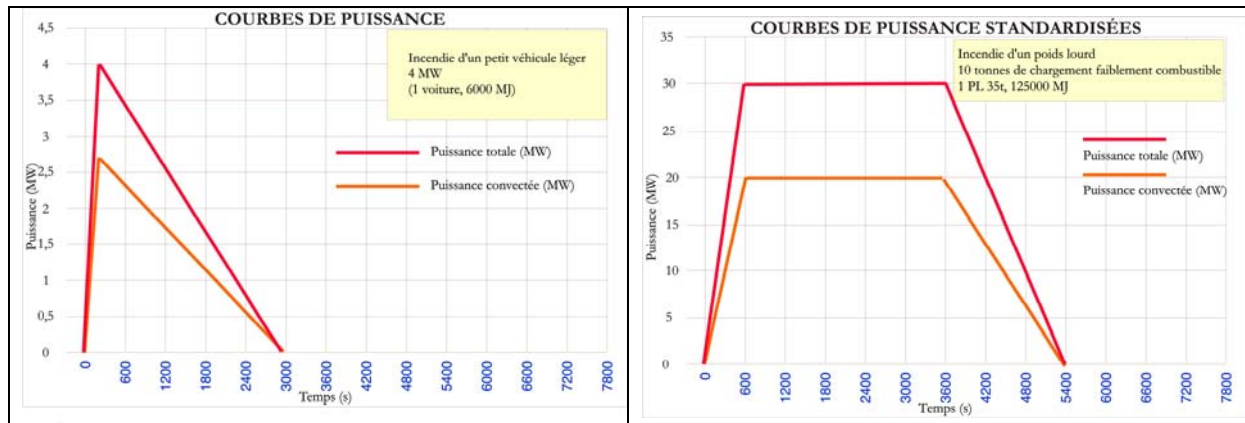
En fonction de ces foyers sources standardisés, des modélisations 1D ou 3D décrivent le déplacement des fumées dans le tunnel avant mise en service du désenfumage, pendant le régime transitoire puis en régime établi. Il est alors possible de définir des zones de dangers pour les personnes.

Ces modélisations sont d'une utilité indiscutable, mais ce ne sont que des modélisations

²⁹ Éventuellement avec l'hypothèse qu'il n'y a pas d'intervention technique ou humaine.

³⁰ Document CETU.

nécessairement imparfaites. Il ne faut donc jamais interpréter les résultats sans une discussion avec des spécialistes du sujet.



4.4. La prise en compte des défaillances

Les équipements sont dimensionnés pour les besoins de l'exploitation normale et pour faire face aux situations d'urgence décrites par les hypothèses de dimensionnement. Les moyens obligatoires sont listés dans l'instruction technique. Tous les équipements sont supposés être disponibles au moment où ils sont sollicités, puis fonctionner normalement pendant le temps nécessaire. Une telle vision optimiste ne correspond quasiment jamais à la réalité et un effort permanent doit être fait pour obtenir une sûreté de fonctionnement satisfaisante.

Il convient donc d'analyser les causes et les conséquences des défaillances d'équipements. Une combinaison de méthodes inductives et déductives participe ainsi à l'effort d'exhaustivité de l'étude.

Une liste de thèmes est donnée ci-dessous à titre de suggestion³¹.

4.4.1. Ventilation et désenfumage

- Perte de ventilation des aménagements pour l'évacuation et la protection des usagers et l'accès des secours.
- Défaillances du changement de configuration ventilation normale / désenfumage.
- Pertes des ventilateurs sous l'effet de la chaleur.
- Perte (totale ou partielle) du désenfumage (en particulier impossibilité d'atteindre un débit ou la vitesse longitudinale spécifiée).
- Perte d'une fonction sas (porte ou pressurisation).
- Défaillances des informations de décision pertinentes pour la mise en œuvre de la ventilation de désenfumage (capteurs et systèmes d'aide).
- Défaillances de fonctionnement d'un canton de désenfumage.
- Défaillances pour la mise en service de plusieurs cantons de désenfumage.

³¹ D'après une première liste que j'avais publiée en 2001. Elle ne correspond pas à un document officiel.

- Remontée des fumées en amont de l'incendie (impact de la localisation de l'accident, conditions météorologiques).
- Défaillances du processus de mise en route de la ventilation de désenfumage (en prenant comme objectif le fait d'atteindre la vitesse recherchée, au bon endroit).

4.4.2. Résistance, comportement au feu et cloisonnement

La résistance au feu et le cloisonnement associé sont des facteurs importants pour le dimensionnement du génie civil (référence : courbe hydrocarbures majorée).

- Perte de résistance au feu.
- Perte de l'indépendance des espaces de circulation vis à vis de la propagation des fumées.

4.4.3. Éclairage, balisage et signalétique

- Perte de la signalisation et de la signalétique des dispositifs de sécurité.
- Perte des dispositifs de signalisation (signalisation d'arrêt du trafic, feux d'affectation de voies, panneaux à message variable, etc.).
- Perte (locale, totale) de l'éclairage normal d'exploitation.
- Perte (locale, totale) d'éclairage de sécurité.
- Défaillances des feux de signalisation et/ou des barrières destinés à faire arrêter les usagers circulant dans le tunnel au moment où une alarme est reçue.
- Défaillances des feux d'affectation des voies de circulation.
- Perte de balisage de sécurité (locale, totale).
- Perte (locale, totale) d'éclairage et de balisage lumineux des aménagements d'évacuation des usagers et d'accès des secours.

4.4.4. Gestion des informations, détections, alarmes

- « Non détection » d'un véhicule arrêté.
- Perte des systèmes de collecte, de traitement local et de transmission des informations.
- Perte des équipements concourant au maintien du fonctionnement des salles de contrôle et de commande.
- Perte de télévision en circuit fermé, de détection automatique d'incident ou d'incendie.
- Défaillances du réseau de surveillance par télévision.
- Défaillances de la détection automatique d'incident.

4.4.5. Énergie

- Défaillances aux points d'entrée du réseau d'alimentation électrique.
- Défaillances dans les alimentations de secours (groupes, onduleurs, lignes d'alimentation).

4.4.6. Communications

Les moyens de communication permettent d'échanger des informations (montantes et descendantes) entre les équipes de l'exploitant et les usagers, entre l'exploitant et les services publics. La perte de communication se traduit par l'absence de réception d'un **message**

exploitable par le destinataire. C'est un facteur aggravant du traitement des situations accidentelles (également confirmé par le retour d'expérience).

- Perte des postes d'appel d'urgence.
- Défaillances de la continuité des communications des véhicules de secours, notamment entre le lieu de l'incident et l'extérieur du tunnel.
- Perte des équipements de retransmission des radiocommunications.
- Défaillances de diffusion des messages de sécurité destinés aux usagers (stations de radiodiffusion retransmises).

4.4.7. Gestion du trafic

La gestion du trafic n'est pas seulement une préoccupation d'exploitation, c'est une composante de la sécurité. En préventif, l'exploitation doit garantir la fluidité du trafic. En cas d'accident, il faut assurer l'évacuation des véhicules situés en aval de l'accident et interdire l'arrivée des véhicules en amont.

- Défaillances de la gestion de la fluidité du trafic en aval d'un accident.
- Défaillances de la gestion de la fluidité du trafic en amont d'un accident.
- Perte des barrières de fermeture du tunnel et de neutralisation de voie.
- Défaillances de la procédure d'interdiction de l'accès au tunnel au niveau des barrières de péage (lorsqu'elles existent).
- Dépassement du délai nominal de fermeture de l'accès à la section sinistrée tunnel en cas d'incendie (polémiques déjà connues).

4.4.8. Lutte contre l'incendie et accès des secours

Comme pour le désenfumage, tous les dysfonctionnements ont des conséquences potentiellement graves. La notion de retard dans l'acheminement des secours, au sens le plus large, permet d'étudier les causes et les conséquences des défaillances. Les défaillances qui ont un impact sur l'intervention des secours comprennent celles qui sont déjà listées ci-dessus lorsqu'elles sont susceptibles de modifier l'environnement des espaces de circulation et de travail.

- Perte du réseau d'eau incendie.
- Défaillances des dépresseurs (éventuellement des surpresseurs).
- Retard dans l'acheminement des secours (exploitant et secours publics).

4.4.9. PCS (Poste Central de Sécurité)

Tout dysfonctionnement global du PCS, qui « pilote » l'ensemble du tunnel et de ses équipements, peut avoir des conséquences graves et être à l'origine d'un *accident système*.

- Défaillances globale du PCS.
- Défaillances de la reprise manuelle (incluant la perte de priorité).
- Défaillances dans le respect des temps de réaction (différentes configurations d'accidents).
- Erreurs humaines.

4.5. Comportements et facteur humain

4.5.1. Les usagers

Ne pas tenir compte d'un comportement aberrant dans l'étude d'une évacuation est certainement... une aberration. Un comportement est aberrant pour un observateur ou pour l'intéressé qui analyse sa propre conduite a posteriori. Il n'est pas aberrant pour celui qui le vit à un instant donné : l'individu réagit alors à ses perceptions, à ses expériences ou à son absence d'expérience, à son état physique et psychologique dans les instants qui précèdent immédiatement la réception d'un « signal de déclenchement ».

La non réception d'un tel signal reçu par un groupe est également possible, soit par mauvaise interprétation, soit parce qu'il n'est pas perceptible ou compréhensible par l'intéressé dans la situation où il se trouve.

Ce constat a conduit à introduire la fonction F1.2. dans l'analyse fonctionnelle : limiter la probabilité des événements du domaine non maîtrisable³².

La relation entre le conducteur et son véhicule a fait l'objet d'études, en particulier pour comprendre des comportements violents chez des personnes normalement sociables dans d'autres circonstances.

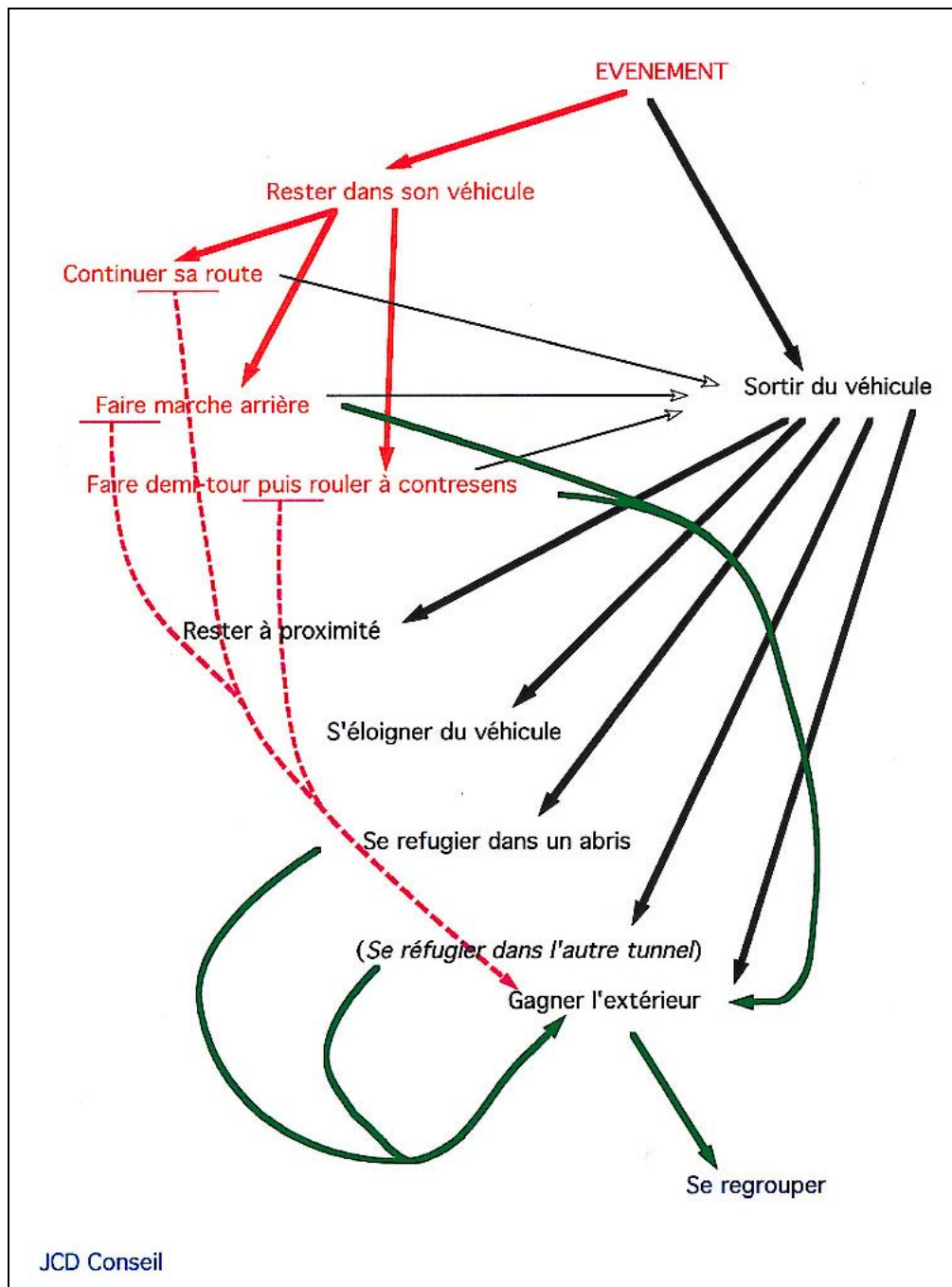
La voiture, c'est un « chez soi » avec un leader, souvent ce sera le conducteur. À l'intérieur on est en sécurité, difficile donc d'en sortir ou d'en faire sortir celui qui n'en a pas envie. La voiture c'est aussi le lieu de stockage d'objets de valeurs (sentimentales ou pécuniaires), difficile donc d'empêcher un occupant qui évacue de faire subitement demi-tour alors qu'il est déjà sur le bon chemin d'évacuation.

Le schéma suivant rappelle aussi que si l'évacuation doit se faire en marchant vers les abris, les automobilistes peuvent faire demi-tour en voiture et perturber la circulation et l'arrivée des secours. Ce fut le cas au tunnel du Fréjus, ce sera encore le cas dans d'autres situations aussi dramatiques.

Tout mettre en œuvre pour provoquer les bons comportements, c'est bien. Nier la réalité des comportements pendant la phase d'étude est particulièrement grave.

Les spécialistes des sciences humaines ont un rôle à jouer dans la sécurité des tunnels.

³² Lire par exemple le rapport sur l'incendie du tunnel du Fréjus en juin 2005 :
http://www.bea-tt.equipement.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=47



4.5.2. Les opérateurs

Tous les grands systèmes sont pilotés. En 2001, en qualifiant les tunnels de « nouveau système de transport », l'intention était d'une part d'insister sur l'aspect système, d'autre part d'introduire cette composante de pilotage pour les ouvrages dotés d'une salle de contrôle.

Les opérateurs semblent parfois les oubliés de l'histoire... Il est vrai qu'ils passent leur temps à des opérations de surveillance routinière, mais ils doivent aussi réagir vite et bien en cas d'urgence, estimer, déclencher, prévenir, communiquer avec les usagers, rendre compte,...

tous les ingrédients sont réunis pour une surcharge de travail, des erreurs de représentation³³. En bref, ces opérateurs sont des opérateurs comme les autres et leur poste de travail est à étudier en conséquence.

Un opérateur ne peut rester seul car il doit toujours pouvoir s'absenter et il a besoin d'aide en cas d'urgence. Les deux opérateurs n'ont pas nécessairement la même qualification. Un point trop souvent négligé : l'importance de l'historique. Pour bien gérer une urgence il faut en connaître la genèse, un « renfort » qui arrive trop tard – dans les toutes premières minutes – risque d'être une surcharge de travail pour l'opérateur impliqué. Pour des raisons identiques, la bascule entre deux salles de contrôles, lorsqu'elles existent, n'est pas concevable hors défaillance en phase d'urgence.

Un exemple : le cas des interphones.

L'interphone est à la disposition des usagers pour appeler le P.C. Tout usager qui appelle en situation d'urgence a un besoin impératif de réponse rapide et pertinente. Les téléphones et points d'appel par interphones étant nombreux, il y aura des appels multiples en cas d'événement grave. La saturation de l'opérateur est alors une évidence, avec une double conséquence : augmentation de sa charge de travail mental à un instant critique, tonalité « occupée » stressante pour l'appelant qui attend un message rassurant.

Des interphones, donnant l'initiative de la communication orale à l'opérateur, mais affichant un message du type « appel reçu, intervention en cours » seraient probablement mieux adaptés. Avec en outre la possibilité d'afficher le message dans plusieurs langues (un simple verre dépoli suffit).

³³ Tout opérateur de salle de contrôle doit connaître « physiquement » l'ensemble de l'ouvrage ; réciproquement, tout agent ayant à dialoguer avec la salle de contrôle doit la connaître et comprendre comment les opérateurs comprennent ce qui se passe sur le terrain. L'efficacité opérationnelle est à ce prix.

5. Compléments

5.1. *Le retour d'expérience*

5.1.1. Intérêt du retour d'expérience

Le retour d'expérience permet de tirer des enseignements à partir d'événements jugés négatifs. L'objectif est d'éviter le retour de ces événements en agissant sur les causes profondes (ou racines).

5.1.2. Critique du retour d'expérience

Le retour d'expérience concerne trop souvent des accidents relativement graves, il consiste à centraliser des rapports rédigés suivant un format plus ou moins formalisé. Dans les cas les plus graves, une commission d'enquête est chargée de préparer un rapport. L'intérêt de ces procédures est évident mais probablement insuffisant.

5.1.3. Analyse des incidents

Suivant la définition retenue, le terme « incident » comprendra ou non les « accidents ». Les enseignements obtenus à partir de l'étude d'un événement ne sont pas proportionnels à la gravité des conséquences observées³⁴. Il convient donc de mettre en place une procédure d'analyse des incidents qui offre la possibilité d'une grande participation à tous les personnels. Le premier niveau concerné est celui de l'exploitant.

Un incident – qui concerne aussi bien la technique que le fonctionnement de l'organisation – n'est pas uniquement imputable au domaine de la sécurité par le constat fait, il l'est aussi par l'évaluation des conséquences potentielles. Cette évaluation pluridisciplinaire est faite par une commission rassemblant des représentants de toutes les activités d'exploitation d'un ouvrage. Le support de la circulation de l'information est la « fiche d'incident ».

Une fiche d'incident est un cadre simple de signalement rapide et d'analyse des incidents (événements non conformes aux attentes de l'observateur et pas uniquement événements définis par la hiérarchie). Elle offre l'avantage, pour le personnel, de faire réfléchir à la notion de cause(s). Pour le management, c'est un moyen de comprendre les représentations d'enchaînements logiques entre constats, causes possibles et conséquences potentielles. Des besoins d'information immédiate ou de formations sont identifiés à la lecture de ces fiches.

Les incidents sont hiérarchisés, les plus importants pouvant faire l'objet d'une enquête complémentaire³⁵.

Pour la motivation du personnel, un bilan périodique est largement diffusé. L'équilibre quant au niveau d'intérêt de signalement d'un incident se trouve après quelques semaines, ou mois, de mise en place du dispositif.

³⁴ Dans les cas graves, la peur de l'engagement de la responsabilité personnelle et la procédure judiciaire peuvent limiter l'expression des acteurs.

³⁵ Une fiche d'incident n'est pas une contravention ! Un climat de confiance est indispensable.

5.2. Les exercices

Pour les généralités sur la conception et l'exploitation des exercices, le lecteur est invité à se reporter au texte de la conférence sur le transport des matières dangereuses.

L'environnement lors d'un exercice en tunnel n'est pas toujours représentatif de la réalité lors d'un accident. Il en est souvent ainsi pour la présence des usagers et il en est quasiment toujours ainsi pour les feux de grande puissance. Ces derniers pourraient en effet détériorer des équipements et exposer les intervenants à des risques inacceptables.

Une analyse des variations des paramètres d'environnement s'impose donc systématiquement pour vérifier que des manœuvres n'ont pas été effectuées dans des zones qui seraient inaccessibles dans un accident réel. Un marquage de ces zones est souhaitable pendant l'exercice pour éviter que des personnels y accèdent de manière idéaliste.

Les fumées froides n'ont pas le même comportement que les fumées chaudes³⁶ et ne donnent pas une bonne représentation de la ventilation de désenfumage.

Les personnels d'intervention doivent être entraînés à se repérer et réaliser des tâches simples dans le noir absolu (port de lunettes spéciales ou de casques adaptés).

L'exploitation des exercices en tunnel doit toujours être rapprochée de l'analyse des scénarios qui sera remise à jour – ou confirmée – à cette occasion.

5.3. Quelle approche pour la sécurité du « système tunnel »

En s'inspirant des travaux sur les objectifs de sécurité dans les transports terrestres³⁷, il est possible de distinguer :

- les « accidents système » pour lesquels usagers ou tiers sont des victimes passives du système de transport,
- les « accidents usagers-système » pour lesquels usagers ou tiers interagissent avec le système pour produire l'accident,
- les « accidents usagers » assimilables à des accidents piétonniers ou de circulation, et où le système n'est que le cadre de ces accidents.

Les règles d'acceptabilité varient suivant ces trois niveaux, le dernier s'appuyant essentiellement sur des mesures réglementaires.

L'accident système invite à utiliser des classes gravité/probabilité (criticité). Il faut alors se poser la question du sens à donner à la démarche sur le plan des responsabilités. Pourtant, la refuser, c'est aussi nier qu'elle peut être inconsciente et donc moins rigoureuse pour l'appréciation du risque.

Ce qui est certain, c'est que l'appel aux méthodes de la sécurité des systèmes est une source de progrès pour la sécurité des tunnels qui deviennent ainsi un **système de transport** à part entière. Le pilotage du système est alors pris en compte, car il est souvent à l'origine des défaillances majeures. Mais attention : la complexité du contrôle d'un système est d'un degré de complexité supérieur à celui du système contrôlé... Le lecteur est invité à se reporter au texte de la conférence T.M.D. pour l'approche cindynique dans laquelle les modèles, les objectifs, les règles et les valeurs retrouvent leur place.

³⁶ Des résistances chauffantes sont utilisées dans des tunnels de métro. Pourquoi ne pas diminuer la visibilité par le port de lunettes spéciales ?

³⁷ Rapport INRETS n° 133 (François BARANOWSKI, décembre 1990).