

La sécurité dans les tunnels

**TRANSPORT DE
MARCHANDISES
DANGEREUSES DANS
LES TUNNELS ROUTIERS**

TRANSPORTS



OCDE



Association
mondiale
de la Route



World Road
Association

La sécurité dans les tunnels

TRANSPORT DE MARCHANDISES
DANGEREUSES
DANS LES TUNNELS ROUTIERS



ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

En vertu de l'article 1^{er} de la Convention signée le 14 décembre 1960, à Paris, et entrée en vigueur le 30 septembre 1961, l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) a pour objectif de promouvoir des politiques visant :

- à réaliser la plus forte expansion de l'économie et de l'emploi et une progression du niveau de vie dans les pays Membres, tout en maintenant la stabilité financière, et à contribuer ainsi au développement de l'économie mondiale ;
- à contribuer à une saine expansion économique dans les pays Membres, ainsi que les pays non membres, en voie de développement économique ;
- à contribuer à l'expansion du commerce mondial sur une base multilatérale et non discriminatoire conformément aux obligations internationales.

Les pays Membres originaires de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. Les pays suivants sont ultérieurement devenus Membres par adhésion aux dates indiquées ci-après : le Japon (28 avril 1964), la Finlande (28 janvier 1969), l'Australie (7 juin 1971), la Nouvelle-Zélande (29 mai 1973), le Mexique (18 mai 1994), la République tchèque (21 décembre 1995), la Hongrie (7 mai 1996), la Pologne (22 novembre 1996), la Corée (12 décembre 1996) et la République slovaque (14 décembre 2000). La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE (article 13 de la Convention de l'OCDE).

Also available in English under the title:

SAFETY IN TUNNELS

Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels

© OCDE 2001

Les permissions de reproduction partielle à usage non commercial ou destinée à une formation doivent être adressées au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France, tél. (33-1) 44 07 47 70, fax (33-1) 46 34 67 19, pour tous les pays à l'exception des États-Unis. Aux États-Unis, l'autorisation doit être obtenue du Copyright Clearance Center, Service Client, (508)750-8400, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA, ou CCC Online : www.copyright.com. Toute autre demande d'autorisation de reproduction ou de traduction totale ou partielle de cette publication doit être adressée aux Éditions de l'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

AVANT PROPOS

La gestion des risques liés au transport de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers constitue un problème important pour de nombreux pays. Trouver les solutions à ces problèmes complexes nécessitent une expérience scientifique variée et un fort soutien financier qui ne peut être disponible au sein d'une seule organisation ou d'un seul pays. C'est pourquoi, le Programme de recherche en matière de transports routiers et liaisons intermodales de l'OCDE et le Comité de l'AIPCR sur les Tunnels Routiers ont lancé un projet de recherche conjoint fondé sur un mandat approuvé par les deux organisations. La Commission européenne a également apporté une contribution importante au projet.

Le Groupe de recherche a conduit les tâches suivantes :

- Examen des réglementations actuelles nationales et internationales.
- Développement d'un système qui pourra être utilisé au niveau international comme une référence commune pour des réglementations harmonisées des tunnels.
- Examen des processus d'évaluation du risque et de prise de décision couramment utilisés et développement d'outils pour améliorer ceux-ci.
- Examen des mesures de réduction du risque et évaluation de leur efficacité pour améliorer la sécurité en fonction des caractéristiques du tunnel et de la circulation.

RESUME ANALYTIQUE
N° ITRD : F 110156

Ce rapport fournit un ensemble très complet qui couvre à la fois les questions réglementaires et techniques concernant le transport de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers. Le rapport propose des réglementations harmonisées afin de faciliter leur contrôle et leur respect par les opérateurs de transport, en vue d'une plus grande sécurité. Un modèle d'évaluation quantitative du risque (EQR) a été développé dans le cadre de ce projet de recherche. Le modèle permet de comparer les risques liés au transport de marchandises dangereuses en utilisant un itinéraire avec tunnel et un itinéraire de déviation. Un modèle d'aide à la décision (MAD) a également été développé. Il est destiné aux décideurs qui peuvent combiner les résultats du modèle EQR avec d'autres données pertinentes (qui ne sont pas de nature scientifique ou technique mais plutôt de nature subjective ou politique). Le MAD aidera le décideur à déterminer l'itinéraire préféré pour le transport de marchandises dangereuses, à améliorer l'infrastructure du tunnel existant ou à mettre en œuvre d'autres mesures nécessaires pour satisfaire les objectifs de sécurité. Enfin, le rapport fournit des informations détaillées sur l'efficacité des mesures qui peuvent être prises pour réduire les risques d'accident dans des tunnels.

Domaines : Aspects économiques et administration ; conception des tunnels, planification de la circulation et des transports ; régulation et réglementation de la circulation ; dispositifs de sécurité routière.

N° domaines : 10 ; 25 ; 72 ; 73 ; 85.

Mots-clés : Accident, coût, danger, dommage matériel, évaluation du risque, évaluation, fret, incendie, infrastructure, législation, planification, prévention des accidents, processus de décision, recommandation, réparation, sécurité, transport de marchandise, transport, tunnel.

TABLE DES MATIÈRES

Synthèse et recommandations	7
La réglementation proposée	7
Le modèle d'évaluation quantitative du risque (EQR)	10
Le modèle d'aide à la décision.....	11
Les mesures de réduction du risque	12
Recommandations.....	13
Les bénéfices attendus	14
<i>Chapitre 1</i> Introduction	17
Objectifs.....	17
Organisation et financement du projet	17
Structure du rapport	18
<i>Chapitre 2</i> Informations relatives à des incendies importants survenus dans des tunnels	21
Résultats.....	21
Conclusions.....	23
<i>Chapitre 3</i> Examen des réglementations nationales et internationales existantes.....	25
<i>Chapitre 4</i> Groupes harmonisés de cargaisons de marchandises dangereuses.....	29
Objectifs de l'harmonisation des réglementations	29
Principes généraux du groupement	29
Le système de groupes proposé	30
Conclusions relatives au système de groupe des cargaisons de marchandises dangereuses....	35
<i>Chapitre 5</i> Le modèle d'évaluation quantitative du risque (EQR).....	37
Description du problème.....	37
Finalité	37
Indicateurs.....	38
Risque sociétal	38
Le risque individuel	39
Autres indicateurs	40
Scénarios d'accident	40
Évaluation de la probabilité d'accident.....	42
Détermination des conséquences physiologiques, des dommages pour les structures et pour l'environnement.....	44
Évaluation des conséquences dans les sections à l'air libre et en tunnel	49
Possibilités de s'échapper ou de se mettre à l'abri.....	50
Analyse de sensibilité	51
Processus de validation.....	51

<i>Chapitre 6</i> Le modèle d'aide à la décision (MAD)	55
Définition du problème constitué par la décision	56
Les entrées du MAD	57
Enquête et choix des méthodologies/outils d'aide à la décision	59
Le programme informatique MAD	59
<i>Chapitre 7</i> Les mesures de réduction du risque	63
Objectifs et contenu	63
Identification des mesures de réduction du risque	64
Effet important	73
Conclusions	74
L'efficacité des mesures originelles de réduction du risque	74
Efficacité des mesures non originelles de réduction du risque qui visent les probabilités d'accident	80
Évaluation des mesures de réduction du risque « non originelles » qui visent les temps de réponse	84
Remarques de conclusion	90
Références	93
Glossaire	94
<i>Annexe</i> : Liste des participants	95

SYNTHESE ET RECOMMANDATIONS

Depuis de nombreuses années, le trafic routier (en particulier celui de marchandises dangereuses) augmente continuellement dans les tunnels. En outre, du fait des progrès des techniques de construction, dans de nombreux pays, les tunnels constituent des solutions techniques de plus en plus intéressantes en termes de rapport coût-efficacité, non seulement pour le franchissement de barrières géographiques mais également pour la traversée de zones urbaines, en minimisant l'impact local sur l'environnement. Alors que la plupart des techniques qui touchent la construction et la sécurité des tunnels progressent régulièrement, les problèmes posés par les marchandises dangereuses n'ont pas encore reçu de traitement satisfaisant.

Un accident grave impliquant des marchandises dangereuses dans un tunnel peut être très coûteux en termes de vies humaines, d'environnement, de dommages causés au tunnel et d'interruption du transport. D'un autre côté, interdire sans raison les marchandises dangereuses dans les tunnels peut créer des charges économiques non justifiées. De plus, les opérateurs peuvent se trouver contraints d'emprunter des itinéraires plus dangereux – au travers de zones fortement peuplées par exemple – augmentant ainsi le risque global.

Les règles et réglementations relatives au transport de marchandises dangereuses dans les tunnels varient considérablement d'un pays à l'autre et même à l'intérieur d'un pays. La définition de « règles et réglementations locales », la prise de décision, la responsabilité et le contrôle sont laissés aux autorités et aux hommes politiques locaux ou provinciaux, aux maîtres d'ouvrage de tunnel ou à des avis « d'experts ». Dans la plupart des cas, il n'existe pas de règles ni de réglementations générales applicables à l'ensemble des tunnels au niveau national.

Cette absence de réglementation systématique est en partie le résultat des limitations des outils disponibles pour apprécier les risques et prendre des décisions. Le présent projet constitue un ensemble complet puisqu'il traite à la fois les questions réglementaires et techniques. Un système pour les réglementations internationales a été conçu à partir d'une approche scientifique. Un certain nombre d'outils indispensables pour décider de la réglementation à appliquer à chaque tunnel ont également été développés.

La réglementation proposée

Actuellement, la planification du transport de marchandises dangereuses nécessite de se référer à différentes réglementations, comportant chacune des listes différentes de cargaisons qui sont autorisées ou interdites dans les différents tunnels, en supposant que le transporteur soit déjà conscient de l'existence d'éventuelles restrictions. La réglementation n'est pas toujours bien respectée, en bonne partie parce qu'elle est difficile à comprendre et à contrôler.

Dans le système proposé dans ce rapport, les autorités sont libres de fixer la réglementation applicable à un tunnel donné. Toutefois, la réglementation devra être exprimée partout de la même manière, en renvoyant aux mêmes listes de cargaisons de marchandises dangereuses qui sont autorisées

ou interdites. Ces « listes » communes de cargaisons de marchandises dangereuses sont appelées « groupes de cargaisons de marchandises dangereuses » (ou plus simplement « groupes de cargaisons »).

Ceci doit améliorer la sécurité car il est plus facile de respecter une réglementation harmonisée et d'en contrôler la bonne application. En outre l'organisation du transport international serait facilitée et on éliminerait ainsi des entraves techniques au commerce et on rationaliserait l'exploitation du transport au plan international.

Dans le système proposé, toutes les cargaisons de marchandises dangereuses sont réparties en quelques groupes de sorte que toutes les cargaisons à l'intérieur d'un même groupe puissent être acceptées ensemble dans un même tunnel. Le nombre de groupes doit rester suffisamment faible pour que le système soit applicable.

Le système proposé se fonde sur l'hypothèse qu'il existe trois dangers majeurs dans les tunnels susceptibles de provoquer un nombre important de victimes et éventuellement des dégâts importants sur la structure :

- Les explosions.
- Les fuites de gaz toxique ou de liquide toxique volatil.
- Les incendies.

On peut sommairement décrire de la manière suivante les principales conséquences de ces dangers et l'efficacité des mesures éventuelles de protection :

- *Explosions importantes.* On peut distinguer deux niveaux différents :
 - *Explosion « très importante »*, comme celle d'une citerne complète de GPL chauffée par un incendie (BLEVE – Explosion de vapeur en expansion provenant d'un liquide en ébullition – suivie d'une boule de feu, dite « bleve chaud ») mais d'autres explosions peuvent avoir des conséquences analogues.
 - *Explosion « importante »* comme celle d'une citerne complète d'un gaz comprimé non inflammable chauffé par un incendie (BLEVE sans boule de feu, dit « bleve froid »).

Une explosion « très importante » (« bleve chaud » ou équivalent) va tuer toutes les personnes présentes dans le tunnel ou dans une portion significative de celui-ci et infliger des dégâts importants à l'équipement du tunnel, voire à sa structure. Les conséquences d'une explosion « importante » (« bleve froid » ou équivalent) seront plus limitées, notamment les dommages provoqués à la structure du tunnel. Il n'y a en général pas de possibilité d'éviter l'explosion ni d'en atténuer les conséquences, surtout dans le premier cas.

- Relâchements importants de gaz toxique. Un relâchement important de gaz toxique peut résulter d'une fuite dans une citerne contenant un gaz toxique (comprimé, liquéfié, dissout) ou un liquide toxique très volatil. Elle va tuer toutes les personnes présentes près de la fuite et dans la zone où la ventilation (qu'elle soit naturelle ou mécanique) va pousser le gaz. Une partie du tunnel peut être protégée mais il n'est pas possible de protéger l'ensemble du tunnel, surtout dans les premières minutes qui suivent l'accident.

- Incendies importants. Selon la géométrie, le trafic et l'équipement du tunnel, un incendie important aura des conséquences plus ou moins lourdes allant de quelques victimes et des dégâts limités à plusieurs dizaines de victimes et des dégâts importants sur le tunnel.

L'ordre de présentation de ces dangers : explosion, fuite toxique (gaz ou liquide volatil), incendie correspond à l'ordre décroissant de gravité de leurs conséquences et à l'ordre croissant d'efficacité des mesures possibles de protection. A partir des hypothèses précédentes, il est proposé un système comportant cinq groupes (A, B, C, D et E), classés par ordre de restrictions croissantes quant aux cargaisons qui peuvent traverser le tunnel :

Groupe A	Toutes les cargaisons de marchandises dangereuses autorisées à l'air libre.
Groupe B	Toutes les cargaisons du groupe A à l'exception de celles susceptibles de provoquer une explosion très importante (« bleve chaud » ou équivalent).
Groupe C	Toutes les cargaisons du groupe B à l'exception de celles susceptibles de provoquer une explosion très importante (« bleve froid » ou équivalent) de provoquer une fuite très importante de toxique (gaz ou liquide très volatil toxique).
Groupe D	Toutes les cargaisons du groupe C à l'exception de celles susceptibles de provoquer un incendie important.
Groupe E	Pas de marchandises dangereuses (sinon celles pour lesquelles aucun marquage n'est exigé sur le véhicule).

Le groupe A est le plus vaste : il recouvre toutes les cargaisons autorisées au transport routier, y compris les plus dangereuses. Le groupe E est le plus restrictif : il ne contient que les cargaisons pour lesquelles aucune signalisation particulière n'est exigée sur le véhicule, c'est-à-dire les moins dangereuses. Des restrictions encore plus sévères (absolument aucune marchandise dangereuse par exemple) ne sont pas possibles à mettre en œuvre pour les autorités : il n'est guère possible pour les autorités de différencier les cargaisons du groupe (qui ne nécessitent pas de signalisation à l'extérieur du véhicule) des véhicules qui ne transportent pas de marchandises dangereuses, à moins de les arrêter pour vérification. Toutes les cargaisons du groupe E se retrouvent dans le groupe D, toutes celles du groupe D dans le groupe C, et ainsi de suite. Ces groupes peuvent servir de point de départ à des réglementations plus complexes, par exemple :

- Groupe C (6h à 22h) – Groupe A (22h à 6h) : Le groupe C est autorisé de 6h à 22h et le groupe A de 22h à 6h : ceci signifie que les cargaisons entrant dans le groupe A mais pas dans le groupe C ne sont autorisées qu'entre 22 heures et 6 heures, tandis que les cargaisons du groupe C le sont à tout moment ;
- Groupe C (franchissement libre) – Groupe B (sous escorte) : Les cargaisons entrant dans le groupe A mais pas dans le groupe B sont interdites, les cargaisons entrant dans le groupe B mais pas dans le groupe C ne sont autorisées que sous escorte, les cargaisons entrant dans le groupe C peuvent franchir librement le tunnel.

Pour les cargaisons comportant plusieurs marchandises dangereuses différentes dans la même unité de transport, on détermine les groupes auxquels appartient chacune des marchandises séparément, et on retient pour l'ensemble du chargement le premier de ces groupes dans l'ordre alphabétique.

Le modèle d'évaluation quantitative du risque (EQR)

La quantification du risque est difficile car de nombreux facteurs et variables influencent les probabilités et conséquences des accidents impliquant des marchandises dangereuses, à l'intérieur comme à l'extérieur des tunnels. Même avec des connaissances d'expert, il est donc difficile d'évaluer le risque pour l'ensemble des circonstances, environnements, conditions météorologiques, etc. Le calcul informatique est un outil indispensable pour développer une approche rationnelle et solide du problème.

Afin d'évaluer les risques et de fixer les réglementations rationnellement, il est nécessaire d'avoir un modèle complet pour traiter à la fois les tunnels et l'air libre. En raison de la complexité du développement d'un tel modèle, il était souhaitable de réaliser cette tâche en coopération internationale. Le modèle d'évaluation quantitative du risque qui en résulte, développé dans le cadre de ce projet, est un outil unique qui peut être utilisé dans tous les pays.

Une évaluation complète des risques impliqués dans le transport de marchandises dangereuses imposerait la prise en compte de toutes les sortes de marchandises dangereuses, de toutes les conditions météorologiques, de tous les accidents possibles, dimensions de brèches, véhicules complètement ou partiellement chargés et de nombreuses autres variables. Comme il est impossible de tenir compte de toutes les circonstances, il faut procéder à des simplifications. Actuellement, le modèle examine treize scénarios d'accident représentatifs des groupes décrits ci-dessus. Si les groupes autorisés dans un tunnel changent, les scénarios d'accident possibles changent. Le modèle d'évaluation quantitative du risque produit des indicateurs de risque pour les différents groupes et fournit un fondement scientifique à la réglementation. Les treize scénarios pris en compte par le modèle sont présentés ci-dessous :

Scénarios représentatifs de chaque groupe de cargaison dans le modèle EQR

Groupe E	Incendie d'un poids lourd sans marchandise dangereuse (20 MW) Incendie d'un poids lourd sans marchandise dangereuse (100 MW)
Groupe D	En plus des scénarios du Groupe E BLEVE ¹ de GPL en bouteilles Relâchement d'acroléine en bouteilles
Groupe C	En plus des scénarios du Groupe D : Feu de nappe d'essence en citerne Explosion d'un nuage de vapeur d'essence en citerne
Groupe B	En plus des scénarios du Groupe C : Relâchement d'ammoniaque en citerne Relâchement de chlore ² en citerne Relâchement d'acroléine en citerne BLEVE de dioxyde de carbone en citerne (sans inclure les effets toxiques)
Groupe A	En plus des scénarios du Groupe B : BLEVE de GPL en citerne Explosion d'un nuage de vapeur de GPL en citerne Feu chalumeau de GPL en citerne

1. BLEVE : Explosion de vapeur en expansion provenant d'un liquide en ébullition.

2. Le chlore est pris en compte dans les pays où son transport sur routes est autorisé en quantités appréciables.

Le modèle d'aide à la décision

Les méthodologies d'aide à la décision ont été étudiées théoriquement depuis de nombreuses années et elles sont appliquées dans différents domaines. On a réalisé une enquête, suivie d'une évaluation des outils confirmés d'aide à la décision, qui ont conclu qu'il n'y a pas de raccourci pour parvenir à une prise de décision rationnelle. Il faut pondérer les différents objectifs, éventuellement contradictoires, les uns vis-à-vis des autres, aussi délicate que puisse paraître la quantification de ces objectifs et de leurs poids. Dans les cas où on n'utilise pas d'outil formalisé d'aide à la décision, la pondération se fait instinctivement.

Lorsqu'il prend des décisions relatives aux groupes à autoriser dans des tunnels, le décideur doit garder présent à l'esprit le fait que les marchandises interdites dans le tunnel doivent être transportées sur un quelconque itinéraire de substitution. Le risque et la gêne sur les itinéraires de substitution vont affecter directement le résultat quant au meilleur groupe à autoriser dans le tunnel d'un point de vue sociétal. Ceci signifie qu'il peut s'avérer non rationnel d'autoriser les mêmes groupes dans deux tunnels identiques qui supportent le même trafic si les itinéraires de substitution diffèrent significativement par exemple en termes de longueur et de densité de population le long de l'itinéraire.

Minimiser le risque pour la vie humaine constitue un des objectifs premiers de la décision relative au groupe à autoriser dans un tunnel. Outre les risques pour la vie humaine, plusieurs autres facteurs doivent être pris en compte lorsqu'on prend une décision relative à l'itinéraire des marchandises dangereuses. Il s'agit d'une procédure complexe et il est donc indispensable de disposer d'un modèle d'aide à la décision pour faciliter une prise de décision rationnelle et venir à son appui. Parmi les critères qui sont évalués et pondérés par le modèle d'aide à la décision figurent :

- Les risques, pour les usagers de la route et la population locale, d'être blessés ou tués, ce pourquoi on utilise les indicateurs du modèle d'évaluation quantitative du risque. Le modèle d'aide à la décision aide le décideur à pondérer ses préoccupations ; par exemple un décideur présentant une aversion au risque considère un accident qui fait cent tués comme moins acceptable que cent accidents faisant chacun un tué.
- Les dommages matériels, liés à d'éventuels accidents sur l'itinéraire avec tunnel ou l'itinéraire de déviation.
- L'impact sur l'environnement lié à un accident sur l'itinéraire avec le tunnel ou de déviation. Les résultats du modèle d'évaluation quantitative du risque sont assez limités pour ce qui est de l'environnement et ne fournissent que des indicateurs approximatifs pour le risque environnemental. Le modèle d'aide à la décision peut être élargi pour accepter une information plus détaillée sur l'environnement.
- Les dépenses directes (ceci recouvre les coûts d'investissement et d'exploitation des mesures de réduction du risque dans le tunnel ainsi que d'éventuels surcoûts pour le transport des marchandises dangereuses).
- Les inconvénients pour les usagers de la route dus à un éventuel accident (temps perdu pendant les travaux de réparation consécutifs à un accident dans le tunnel).
- Les nuisances pour la population locale (impact sur l'environnement du trafic de marchandises dangereuses, à l'exclusion des conséquences d'un accident éventuel, mais en incluant éventuellement l'impact psychologique).

Tout autre critère jugé pertinent par le décideur peut également être pris en compte dans le problème décisionnel. Pour prendre sa décision, le décideur doit déterminer quels sont les critères pertinents et leur pondération relative. Ces choix doivent refléter les préférences du décideur.

Un outil informatique a été développé pour permettre tenir compte d'une manière rationnelle des critères ci-dessus. Le modèle d'aide à la décision inclut l'option de choisir entre la méthodologie bayésienne classique et des méthodologies multicritères. Il utilise directement les résultats du modèle d'évaluation quantitative du risque. D'autres données techniques sont entrées, comme par exemple les coûts de réparation après un accident ou le surcoût de transport des marchandises dangereuses sur un itinéraire plus long. Ainsi le décideur dispose de toutes les entrées d'ordre technique et il n'a à fournir que les préférences à caractère politique.

Les mesures de réduction du risque

Il existe plusieurs mesures qui peuvent être mises en œuvre dans les tunnels pour réduire la probabilité et/ou les conséquences d'un accident dans un tunnel. Ces mesures ont une influence sur le choix de la réglementation qui fixe les restrictions appliquées au transport de marchandises dangereuses dans un tunnel. Des études poussées ont été menées dans le cadre de ce projet en vue de déterminer l'efficacité de ces mesures.

Un certain nombre de ces mesures sont incluses dans le modèle d'évaluation quantitative du risque. Le modèle peut être utilisé pour examiner les effets de l'introduction de ces mesures dans un tunnel. On a en outre examiné un certain nombre d'autres mesures et décrit des procédures qui permettraient une extension du modèle d'évaluation quantitative du risque pour inclure des mesures de sécurité qui ne faisaient pas partie de la spécification initiale du modèle.

Liste des mesures de réduction du risque classées selon leur finalité principale

MESURES POUR REDUIRE LA PROBABILITE D'UN ACCIDENT		
Liées à la conception et à l'entretien du tunnel		
Profil en travers et perception visuelle du tunnel	Tracé Éclairage (normal)	Entretien Revêtement de la route (frottement)
Liées à la circulation et aux véhicules		
Limitation de vitesse Interdiction de dépasser	Escorte Distance entre véhicules	Contrôles des véhicules
MESURES POUR REDUIRE LES CONSEQUENCES D'UN ACCIDENT		
Alerte, information, communication de l'exploitant et des services de secours		
Télévision en circuit fermé Détection automatique d'incident	Détection automatique d'incendie Communication Radio (services)	Identification automatique des véhicules Téléphone de secours
Communication avec les usagers		
Téléphones de secours Communication Radio (usagers)	Panneaux/signaux d'alerte	haut-parleurs
Évacuation ou protection des usagers		
Issues de secours Contrôle des fumées	Éclairage (de secours) Équipements résistant à l'incendie	Gestion des défaillances
Réduction de l'importance de l'accident		
Équipements de lutte contre l'incendie Équipes de secours	Drainage Revêtement de la route (non poreux)	Plan d'action d'urgence Escorte
Réduction des conséquences pour le tunnel		
Structure résistante à l'incendie	Structure résistante à l'explosion	

Des méthodes aussi bien qualitatives que quantitatives pour l'analyse des effets des mesures de réduction du risque sont présentées dans ce rapport. En utilisant le modèle d'évaluation quantitative du risque conjointement à ces méthodes, il est possible d'évaluer l'effet des mesures de réduction du risque pour un tunnel spécifique.

Les effets des mesures sont propres à chaque tunnel, et dépendent de ses caractéristiques, du trafic et les conditions locales. Il n'est donc pas possible de dégager un effet général des mesures applicable à tous les tunnels. De même, les coûts des mesures varient en fonction de chaque type de tunnel. Ils vont également différer considérablement selon que les mesures sont incorporées dès la phase initiale de conception et de construction ou si elles sont mises en place dans le cadre de travaux d'amélioration. Il vaut donc mieux estimer les coûts pour chaque cas particulier de tunnel de façon à pouvoir évaluer correctement, pour le cas concerné, l'efficacité (ou rapport coût-efficacité) des mesures.

Recommandations

Mise en œuvre d'un cadre réglementaire et technique cohérent

Les résultats du présent projet sont applicables dans tous les pays dotés de tunnels. L'analyse des risques et le développement d'outils d'aide à la décision menés dans le cadre du projet ouvrent aux administrations des routes des options leur permettant d'améliorer le transport des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers.

- Il est vivement recommandé que les administrations qui réglementent le transport des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers utilisent le système de groupes de cargaisons dangereuses comme base de leurs réglementations. Ce système devrait être mis en œuvre à la fois aux niveaux nationaux et internationaux.
- Il est recommandé que, grâce à l'adoption de ces réglementations, soient définis les groupes de cargaisons autorisés dans chaque tunnel. Ceci va imposer une nouvelle signalisation routière, à la fois sur les accès au tunnel et sur les itinéraires de substitution.
- L'adoption du système de groupes impose que la prise de décision repose sur une base systématique et scientifique. A cette fin, le modèle d'évaluation quantitative du risque et le modèle d'aide à la décision développés dans le cadre de ce projet sont actuellement ce qui existe de mieux dans ce domaine et leur utilisation est recommandée dans tous les pays en appui à l'adoption du système de groupes proposé.

Le cadre réglementaire international

Le Comité d'Experts pour le transport des marchandises dangereuses des Nations-Unies est l'organe le mieux adapté pour agir en tant que gardien, promoteur et responsable du développement de ce système puisqu'il s'agit d'un organe mondial. Il est *recommandé que le système soit intégré aux réglementations-types de l'ONU et que sa promotion soit assurée dans toutes les régions du monde.* Ceci constitue un mécanisme important de promotion de l'efficacité globale du transport grâce à la mise en œuvre d'un cadre réglementaire cohérent et harmonisé.

Pour tenir compte du fait que le Comité d'Experts pour le transport des marchandises dangereuses des Nations-Unies traite de réglementations multimodales qui ne sont pas obligatoires,

l'alternative spécifique à la route la plus réaliste est le Groupe de Travail n°15 sur le transport des marchandises dangereuses de la Commission Économique pour l'Europe des Nations-Unies. Ce groupe de Travail est responsable de l'Accord Européen sur le *Transport international des marchandises dangereuses par la route (ADR)* qui est appliqué dans 34 États signataires et qui sert de base aux législations nationales dans l'Union européenne. Toutefois, de nombreux États non-européens vont vraisemblablement souhaiter adopter cette réglementation et seront donc vivement intéressés à suivre la manière dont cette réglementation évolue à l'avenir.

Il est recommandé que le Comité concerné des Nations-Unies soit chargé de la conception des panneaux de signalisation nécessaires pour la mise en œuvre et l'application de la réglementation.

Application et développement des modèles

Les modèles d'évaluation quantitative des risques et d'aide à la décision exigent des données très complètes et il est indispensable de bien les comprendre ainsi que leurs fonctionnalités. Pour aider les utilisateurs, il est recommandé :

- d'établir une base de données des applications, accessible par Internet, qui reprenne toutes les expériences avec le modèle d'évaluation quantitative du risque. Cette base de données devrait contenir les résultats de toutes les applications nationales disponibles du modèle.
- d'établir un réseau d'utilisateurs confirmés des modèles qui puissent être contactés lorsque les utilisateurs ne parviennent pas à résoudre les problèmes par eux-mêmes.
- d'organiser des réunions de groupes de nouveaux utilisateurs afin de renforcer l'expertise en matière d'utilisation des modèles dans le monde entier.

Ce recueil d'expériences et de résultats peut constituer une base à partir de laquelle poursuivre l'amélioration du logiciel d'évaluation quantitative du risque et du manuel de référence. L'objectif est un processus continu d'amélioration du logiciel d'évaluation quantitative du risque, impliquant tous les utilisateurs et leurs expériences.

Les bénéfices attendus

Ce projet est centré sur la sécurité du transport routier de marchandises dangereuses. Il est, en outre, susceptible de générer d'autres avantages en termes de gestion du transport routier et de l'infrastructure, avantages qui découlent de la mise en œuvre des recommandations et de l'adoption des outils développés :

- La réduction du coût des dommages pour l'infrastructure routière résultant d'accidents dans un tunnel ou sur l'itinéraire de déviation.
- La réduction de l'impact sur l'environnement dû à un accident dans un tunnel ou sur l'itinéraire de déviation.
- L'amélioration de l'efficacité du réseau découlant de la mise en œuvre d'une réglementation cohérente et harmonisée pour le transport de marchandises dangereuses dans les tunnels.

- L'amélioration de l'efficacité globale du transport grâce à la réduction des coûts en temps pour les usagers de la route associés à un éventuel accident (temps perdu en raison de l'accident lui-même, des itinéraires de déviation et pendant les travaux de réparation consécutifs à un accident dans un tunnel).
- L'efficacité accrue de l'utilisation des fonds investis dans l'aménagement/construction de l'infrastructure de tunnel, les systèmes de gestion et les mesures de réduction du risque.
- L'efficacité accrue de l'exploitation du transport routier résultant du respect de la réglementation et du choix d'itinéraires corrects pour les véhicules.

Chapitre 1

INTRODUCTION

Depuis de nombreuses années la circulation routière (en particulier le trafic lourd de marchandises) dans les tunnels augmente continuellement. Dans de nombreux pays, pour des raisons liées à la démographie ou à l'environnement, le nombre effectif de tunnels routiers a également augmenté. Alors que la plupart des techniques qui touchent la construction et la sécurité des tunnels progressent régulièrement, les problèmes posés par les marchandises dangereuses n'ont pas encore reçu de traitement satisfaisant.

Un accident grave impliquant des marchandises dangereuses dans un tunnel peut être coûteux en termes de vies humaines, d'environnement, de dommages causés au tunnel et d'interruption du transport. Par contre, interdire sans raison les marchandises dangereuses dans les tunnels peut créer des charges économiques non justifiées. En outre, les exploitants peuvent se trouver contraints d'emprunter des itinéraires plus dangereux – au travers de zones fortement peuplées par exemple – augmentant ainsi le risque global.

Objectifs

Le but de cette recherche est d'améliorer la sécurité globale du transport routier de marchandises dangereuses et corrélativement de faciliter l'organisation de ce transport, évitant ainsi les surcoûts inutiles et favorisant le développement économique. Les objectifs sont :

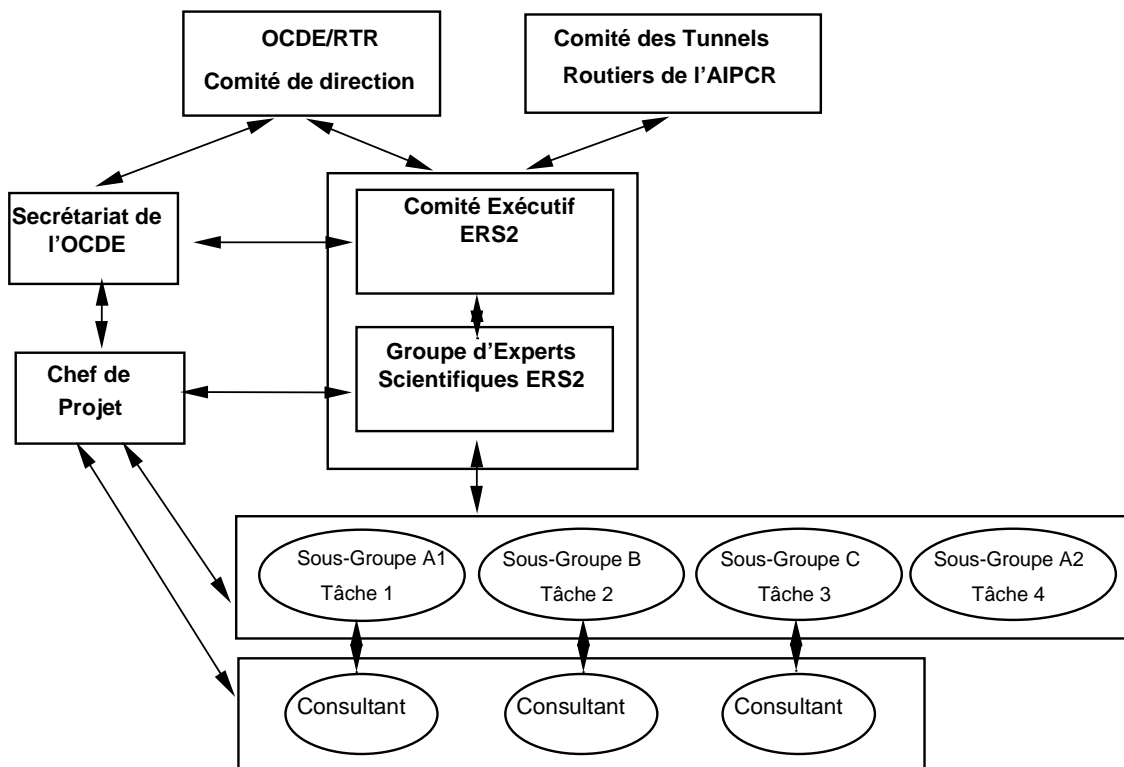
- De rationaliser et d'harmoniser le processus de prise de décision qui débouche sur l'autorisation ou l'interdiction du transport de marchandises dangereuses dans chaque tunnel routier, et la réglementation permettant la mise en œuvre de ces décisions.
- D'évaluer et d'améliorer les mesures destinées à réduire les risques liés aux marchandises dangereuses dans les tunnels routiers et d'optimiser leur mise en œuvre.

Organisation et financement du projet

Compte tenu de la complexité et de l'étendue du sujet, l'étude ne pouvait être menée que dans le cadre d'une coopération internationale. Le projet a été organisé conjointement par l'OCDE et l'AIPCR, avec une contribution substantielle de la Commission européenne. Douze pays ont participé à l'étude, en finançant la participation de leurs experts (voir annexe). En outre, onze pays et la Commission européenne ont contribué à un financement total de FRF 5.5 millions affecté à plusieurs contrats de recherche. Ces pays sont : l'Autriche, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la France, le Japon, la Norvège, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse.

La figure 1.1 reprend la structure d'ensemble du projet. Le Comité de direction OCDE RTR et le Comité des tunnels routiers (C5) de l'AIPCR prennent, au niveau de la direction, les décisions relatives aux objectifs, au lancement, à l'organisation, au financement et au suivi du projet. Ils ont créé un Comité exécutif pour suivre les questions financières et politiques. Le Groupe d'experts scientifiques était, quant à lui, chargé des objectifs détaillés, du budget, du suivi du travail des bureaux d'études, de l'avancement général, des résultats et du contrôle de qualité de la recherche. Quatre sous-groupes ont été constitués pour traiter les différentes tâches.

Figure 1.1. Organisation du projet



Structure du rapport

Outre la note de synthèse et recommandations et le présent chapitre d'introduction, le rapport comprend six autres chapitres :

Chapitre 2 : Information relative à des incendies importants survenus dans des tunnels

Étant donné les dangers causés par les incendies dans les tunnels même s'ils n'impliquent pas de marchandises dangereuses, trente-trois incendies importants dans des tunnels ont été étudiés. Ce chapitre résume l'étude.

Chapitre 3 : Examen des réglementations nationales et internationales existantes

Le chapitre 3 résume les résultats d'une étude menée en deux missions :

- La Mission 1 a consisté en une vaste enquête par courrier pour recueillir et analyser des données sur de nombreux pays.
- La Mission 2 visait à obtenir des données plus précises par le biais d'entretiens en profondeur portant sur une sélection de pays et à examiner les problèmes d'application (et autres) pour tirer une série de conclusions.

Chapitre 4 : Groupes harmonisés de cargaisons de marchandises dangereuses

Dans ce chapitre sont examinées des propositions pour un système harmonisé de catégories de marchandises qui peuvent emprunter les tunnels. L'adoption d'un tel système au plan international faciliterait les réglementations relatives à l'autorisation des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers ou à leur déviation.

Chapitre 5 : Modèle d'évaluation quantitative du risque (EQR)

Ce chapitre présente dans ses grandes lignes un modèle d'évaluation quantitative du risque spécifiquement développé pour évaluer les risques impliqués par le transport des marchandises dangereuses dans les tunnels ou à leur déviation.

Chapitre 6 : Modèles d'aide à la décision

Le chapitre 6 examine les différents types de modèles d'aide à la décision (MAD) et présente en particulier un MAD développé pour utiliser les résultats du modèle EQR et d'autres données en vue de décider quelles sont les marchandises dont le passage peut être accepté dans un tunnel.

Chapitre 7 : Mesures de réduction du risque (y compris au niveau de l'exploitation des transports et des tunnels)

Ce chapitre examine les mesures qui limitent les risques impliqués par le transport de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers. Des mesures bien adaptées à chaque cas spécifique sont recommandées, avec des spécifications détaillées et une évaluation de leurs coûts et de leur efficacité à l'égard des risques.

Chapitre 2

INFORMATIONS RELATIVES À DES INCENDIES IMPORTANTS SURVENUS DANS DES TUNNELS

Résultats

Dans le cadre de ce projet, des informations sur des incendies importants survenus dans des tunnels ont été recueillies auprès des pays de l'OCDE et de l'Afrique du Sud, en s'appuyant à la fois sur le contenu de publications et sur des contacts directs avec des responsables de tunnels. Un certain nombre d'incendies se sont produits il y a relativement longtemps (jusqu'à 1949) et il était donc difficile d'obtenir des informations détaillées à leur sujet. Pour certains autres, il s'est également avéré difficile d'obtenir toute l'information nécessaire ou souhaitée.

L'étude a porté sur 33 incendies importants en tunnel impliquant des poids lourds ou plusieurs voitures. Les incendies ont été répartis en quatre groupes :

- A. Incendies impliquant de l'essence (2 incendies), du gaz (1 incendie) et du bisulfate de carbone (1 incendie) : 4 incendies.
- B. Incendies impliquant des produits en matière plastique et d'autres produits à base de pétrole : 7 incendies.
- C. Incendies provoquant des dommages corporels (mais ne relevant pas des catégories A ni B) : 11 incendies.
- D. Autres incendies impliquant des poids lourds, des autocars ou plusieurs voitures : 11 incendies.

Les détails des incendies relevant des groupes A, B et C sont résumés dans le tableau 2.1. On n'a trouvé que quatre incendies de type A. Il s'agit de ceux des tunnels de *Isola delle Femmine* (Italie) (camion-citerne de gaz); de *Caldecott* (États-Unis), (33 000 litres de carburant), de *Holland* (États-Unis), (11 tonnes de bisulfate de carbone) et de *Chesapeake Bay* (États-Unis), (2 000 litres de carburant). Deux des incendies ont été provoqués par une collision, un par un pneu en flamme et le quatrième par une enveloppe de citerne tombée d'un camion dans le tunnel. Douze personnes ont été tuées dans ces incendies et 23 blessées (66 autres ont souffert d'avoir inhalé de la fumée). Ces incendies ont duré plus de quatre heures.

On a trouvé sept incendies de type B. Deux d'entre eux ont été provoqués par des collisions, quatre par des problèmes de moteur et l'un par un pneu en flamme. Douze personnes ont été tuées dans ces incendies et cinq blessées, et 73 ont souffert d'avoir inhalé de la fumée. La plupart de ces incendies ont duré plus d'une heure.

Tableau 2.1. **Présentation synthétique des incendies étudiés**

Type d'incendie	Nom du tunnel	Pays	Longueur du tunnel (m)	Date de l'incendie	Cause de l'incendie	Durée de l'incendie	Marchandises brûlées	Tués	Blessés
A	Holland	États-Unis	2 567	13.05.1949	Marchandises	4 h	Bisulfate de carbone	0	0
A	Chesapeake Bay	États-Unis		03.04.1974	Pneu	4 h	Carburant	0	1
A	Caldecott	États-Unis	1 083	07.04.1982	Collision	3 h	33 000 l de carburant	7	2
A	Isola delle Femmine	Italie	148	1993	Collision		Camion-citerne de gaz	5	20
B	Tauern	Autriche	6 400	29.05.1999	Collision	15 h	Peinture	12	0
B	Fréjus	France	12 870	05.05.1993	Moteur	2 h	Plastique	0	0
B	Porte d'Italie	France	425	11.08.1976	Moteur	45 mn	Polyester	0	0
B	Moorfleet	Allemagne	243	31.08.1969	Pneu	2 h	Polyéthylène	0	0
B	Hovden	Norvège	1 283	13.06.1993	Collision	2 h	Polyéthylène	0	5
B	Guadarrama	Espagne	2 870	14.08.1975	Boîte de vitesse	3 h	Résine de pin	0	0
B	Blue Mountain	États-Unis	1 302	1965	Moteur		Huile de poisson	0	0
C	Pfänder	Autriche	6 719	10.09.1995	Collision	1 h	Pain	3	0
C	Mt Blanc	France	11 600	24.03.1999	Moteur	53 h	Margarine, farine	39	0
C	L'Arme	France	1 100	09.09.1986	Collision			3	5
C	Peccorila Galleria	Italie	662	1983	Collision		Poisson	9	20
C	Serra Ripoli	Italie	442	1993	Collision	3 h	Papier	4	4
C	Kajiwara	Japon	740	17.04.1980	Collision	2 h	Peinture	1	0
C	Nihonzaka	Japon	2 045	11.07.1979	Collision	4 jours		7	3
C	Sakai	Japon	459	15.07.1980	Collision	3 h		5	5
C	Velser	Pays-Bas	768	11.08.1978	Collision	2 h	Fleurs, boissons non alcoolisées	5	5
C	Huguenot	Afrique du Sud	4 000	27.02.1994	Boîte de vitesse	1 h		1	28
C	Gumefens	Suisse	343	1987	Collision	2 h		2	3

Onze incendies de type C ont été documentés. Neuf ont été provoqués par des collisions et deux par des problèmes de moteur. Parmi les dommages corporels déclarés, beaucoup ont été provoqués par la collision préalable au déclenchement de l'incendie. Soixante dix-sept personnes ont été tuées et 73 blessées dans ces onze incendies.

Au cours des 33 incendies couverts par l'étude (types A à D), 103 personnes ont été tuées, 101 ont été blessées et 139 personnes ont été déclarées comme ayant souffert de l'inhalation de fumée. Huit autobus, environ 200 camions, environ 150 voitures particulières et 15 autres véhicules ont été détruits par le feu. Ces incendies ont entraîné la combustion des marchandises suivantes, pour la plupart non classées comme dangereuses pour le transport ou comme posant des problèmes particuliers :

- Pain, margarine et farine, papier (deux cas), poisson, bicyclettes dans des emballages carton et plastique, boissons non alcoolisées (deux cas), voitures particulières (huit cas), camion frigorifique, coton.
- Peinture (deux cas), poubelles en plastique, huile de poisson, polyéthylène (deux cas), résine de pin, fibres de polyester.
- Bisulfate de carbone, camion citerne de carburant (deux cas), camion citerne de gaz.

Sur ces 33 incendies, un accident de la circulation est la cause déclarée dans 13 cas, impliquant tous plus d'un véhicule. Un problème lié aux organes du véhicule est cité comme cause principale dans 18 cas (défaillance du moteur : 12 cas, des freins : un cas, de la boîte de vitesses : deux cas, des pneumatiques : trois cas). Dans un cas, une enveloppe de citerne est tombée du véhicule et dans un cas la cause est restée inconnue.

Dans 20 cas, le feu a démarré dans un camion/véhicule lourd de marchandises, dans quatre cas, dans un autocar, dans trois cas dans une voiture particulière, dans deux cas dans un camping-car et dans un cas, dans une grue mobile. Les incendies ont entraîné la perte de 147 voitures particulières, de 200 camions ou ensembles articulés, de huit autocars, de trois camionnettes ou camping-cars, de deux camions-citernes, de deux véhicules d'incendie et de deux motocyclettes.

La majorité des incendies ont duré entre une et cinq heures. Un incendie a duré plus de 53 heures (Mont-Blanc, France/Italie) et un quatre jours (Nihonzaka, Japon).

Sur ces 33 incendies, 18 sont survenus avant 1990 et 15 en 1990 ou ultérieurement. Toutefois, dans la mesure où il se peut que les déclarations se soient améliorées ces dix dernières années, on ne peut pas dire que le nombre d'incendies dans les tunnels ait augmenté ces dernières années. Leur nombre dans la première et dans la seconde moitié des années 90 était aussi le même. Sur les 22 incendies pour lesquels l'heure était connue, 12 sont survenus entre midi et minuit. Dix ont pris place après 18 heures mais avant 8 heures du matin. Cette période est habituellement considérée comme ayant un trafic faible.

Conclusions

Il est difficile de tirer des conclusions claires et statistiquement significatives à partir de 33 incendies importants en tunnel. Le taux de gravité élevé comparé à d'autres accidents de la circulation est cohérent avec le point de vue selon lequel les incendies dans les tunnels constituent un problème spécifique et grave. Il faut toutefois noter que les collisions ou accidents de la circulation

causent moins de 50 % de ces incendies. La plupart des incendies sont provoqués par un problème de nature technique ou électrique à bord du véhicule.

Pour réduire le nombre d'incendies dans les tunnels, il faut réduire le potentiel d'incidents et d'accidents et lorsqu'un accident survient, il doit être traité aussi rapidement que possible avec une forte expertise. De nombreux problèmes sur les véhicules paraissent liés à des parcours sur des pentes longues et raides, souvent à des altitudes élevées. Trois mesures significatives pourraient être : d'imposer l'installation de systèmes automatiques d'auto-extinction sur tous les poids lourds, d'imposer des inspections régulières et de construire des aires de repos à intervalles réguliers le long des routes de façon à ce que les conducteurs fassent reposer leur véhicule et laissent refroidir le moteur.

De nombreux rapports d'incendies notent que des responsabilités claires et des temps de réponse courts sont essentiels pour diminuer les conséquences des accidents et des incendies. De nombreux rapports plaident pour la définition d'un plan d'urgence et la formation du personnel.

Il apparaît que de nombreux conducteurs ne savent pas quoi faire en cas d'incendie. Même si la plupart des tunnels sont équipés d'installations de lutte contre les incendies (extincteurs et bouches d'incendie), les conducteurs ne savent pas s'en servir. Une mesure très efficace pourrait consister en des programmes d'information ou d'éducation à destination des conducteurs de poids lourds.

L'étude a trouvé que les pompiers ont été avertis dans la plupart des cas et que l'intervention paraissait le plus souvent avoir été rapide. Ils ont également réussi à maîtriser la plupart des incendies, même en présence de marchandises dangereuses. On trouve, dans une étude américaine portant sur des incendies importants dans des tunnels (Egilsrud, 1984), des commentaires relatifs à l'utilisation des *sprinklers* (extincteurs automatiques). Dans l'étude de l'OCDE, un seul des exploitants interrogés a répondu que des *sprinklers* auraient été utiles. Dans un seul cas, l'incendie de Nihonzaka, on dispose d'indications sur l'utilité effective des *sprinklers*, toutefois dans ce cas, l'incendie est reparti après avoir été contenu dans un premier temps.

Le rapport de Egilsrud se penche également sur la question de savoir si les pompiers doivent essayer d'interrompre la combustion de marchandises inconnues ou dangereuses compte tenu du danger que cela peut comporter pour eux. Parmi les incendies les plus importants pris en compte dans ce rapport, beaucoup impliquaient la combustion de marchandises qui ne sont pas classées comme dangereuses. On peut penser que des incendies impliquant des marchandises dangereuses poseraient des problèmes plus importants que ceux mis en avant dans ce rapport. Dans l'étude menée dans le cadre du présent projet, quatre incendies seulement impliquaient du fuel, du gaz ou d'autres marchandises dangereuses. D'autres produits à base de pétrole comme des matières plastiques étaient impliqués dans sept incendies. Dans les incendies restants, ce sont des produits ordinaires comme du papier, de la farine, des fleurs, des boissons non alcoolisées, etc. qui ont brûlé. Il est important de noter que les poids lourds ont de gros réservoirs contenant du gazole, de l'huile et transportent fréquemment de petites bouteilles de propane.

Chapitre 3

EXAMEN DES RÉGLEMENTATIONS NATIONALES ET INTERNATIONALES EXISTANTES

Une des premières tâches menées dans le cadre de ce projet a été d'examiner les réglementations nationales et internationales existantes en matière de transport des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers. Des bureaux d'études ont été chargés de systématiser les informations recueillies au moyen de questionnaires soumis à 24 pays, éclaircir les réponses et établir des recommandations relatives à la poursuite du travail d'analyse. Vingt-deux pays au total ont répondu, dont l'un n'avait pas de tunnel routier, si bien que l'analyse repose sur les informations fournies par 21 pays.

Des informations complémentaires plus détaillées ont été ensuite recueillies auprès de neuf pays en faisant appel à d'autres questionnaires et à des entretiens. Ces pays sont : l'Allemagne, l'Autriche, les États-Unis (l'État de Californie), la France, le Japon, la Norvège, les Pays-Bas, le Royaume-Uni et la Suisse. L'objectif était d'examiner les tunnels routiers existants ainsi que les règles, réglementations et politiques relatives au transport des marchandises dangereuses dans ces tunnels. Des problèmes posés par les réglementations existantes en matière de prise de décision, contrôle, exploitation et transport ont été identifiés.

Le présent chapitre résume les résultats des deux études, les rapports complets (OCDE et AIPCR, 1996, 1997) sont disponibles sur Internet et contiennent une base de données pour aider à approfondir l'analyse des réponses au questionnaire.

Les définitions du transport routier de marchandises dangereuses sont presque normalisées dans de nombreuses régions de l'OCDE. En Europe, par exemple, les codes ADR (*Accord Européen Relatif Au Transport International Des Marchandises Dangereuses Par Route*) sont couramment utilisés (ou servent de base) pour définir le transport routier de marchandises dangereuses. La plupart des États aux États-Unis et des provinces au Canada suivent des codes conformes aux réglementations types de l'ONU. L'Australie et le Japon ont leurs propres codes pour définir les marchandises dangereuses, quoique l'Australie soit actuellement entrain de s'aligner sur les Nations-Unies.

Par contre, les règles et réglementations relatives au transport des marchandises dangereuses dans les tunnels varient considérablement d'un pays à l'autre et même à l'intérieur d'un pays. Des règles et réglementations applicables à des tunnels spécifiques ont été établies dans un certain nombre de pays. La définition, la prise de décision, la responsabilité et le contrôle sont laissés aux autorités et aux hommes politiques locaux ou provinciaux, aux maîtres d'ouvrages des tunnels ou à des avis « d'experts ». Dans la plupart des cas, il n'existe pas de règles ni de réglementations générales applicables à l'ensemble des tunnels routiers au niveau national.

Il est fréquent que les règles et réglementations soient définies et mises en application pour des tunnels avec des caractéristiques particulières, par exemple, tunnels immergés, tunnels urbains, tunnels avec une forte densité de trafic ou tunnels anciens. Les restrictions imposées varient considérablement. Citons : la distance entre véhicules, la limitation de vitesse, les plages d'interdiction horaires ou

journalières, l'exigence d'escortes, la notification obligatoire de la cargaison, de la quantité et du type des matières, les obligations à respecter par les véhicules et les tunnels, etc.

Il est remarquable que les pays et/ou les régions n'ayant que peu de tunnels aient souvent des règles et réglementations plus nombreuses et plus strictes pour le transport de marchandises dangereuses dans les tunnels que les pays ayant de nombreux tunnels. En Europe, par exemple, les Pays-Bas et la région flamande de la Belgique ont des réglementations strictes sur l'ensemble ou sur certaines, des matières dangereuses alors que la Norvège (575 kilomètres de tunnels) et l'Italie (600 kilomètres de tunnels) n'ont que peu ou pas de restrictions.

Dans la plupart des pays, la décision d'imposer ou non, pour un tunnel, des restrictions au transport de marchandises dangereuses, *ne* repose *pas* sur des Évaluations Quantitatives du Risque (EQR) détaillées, à des fins de comparaison des risques. Toutefois, un certain nombre de pays ont l'intention d'adopter cette approche pour de futures réglementations.

Les réglementations existantes posent un certain nombre de problèmes en matière de prise de décision, contrôle, exploitation et transport.

- La pratique d'autoriser le transport de marchandises dangereuses dans de nombreux tunnels est en contradiction avec les règles qui posent le contraire comme principe.
- La tendance nouvelle à fonder la prise de décision sur des études de risque n'est pas prévue dans les réglementations actuelles.
- Les réglementations actuelles ne s'appliquent qu'aux tunnels propriété d'état, aucune réglementation n'existe pour les tunnels appartenant aux collectivités locales.
- Les écarts importants constatés dans les interdictions entre les différents tunnels posent problème aux conducteurs puisqu'il leur est difficile d'être au courant des réglementations en vigueur dans chacun des tunnels rencontrés sur leur itinéraire.
- L'absence de notification bien à l'avance grâce à des informations adaptées sur des panneaux d'information ou de signalisation routière relatifs au trafic de marchandises dangereuses pose problème dans de nombreux pays.
- Il n'y a pas d'obligation stricte de signaler les itinéraires de déviation si un tunnel est interdit ou a des limitations pour les marchandises dangereuses.
- Certains transporteurs ou conducteurs, en particulier parmi les étrangers au pays, ne sont pas familiarisés avec les restrictions dans les tunnels. L'information relative aux restrictions en vigueur n'est pas systématiquement fournie au franchissement des frontières ou dans les circulaires fédérales/internationales.
- Les restrictions peuvent inciter les véhicules lourds à utiliser des rues et des routes moins bien adaptées à ce type de trafic.

Parmi les problèmes identifiés, beaucoup trouveraient une solution dans l'introduction d'une signalisation routière normalisée au plan international aussi bien pour les interdictions de marchandises dangereuses que pour les itinéraires de déviation disponibles.

En outre, il est essentiel que les transporteurs soient informés des différentes réglementations, par le biais, par exemple, d'une large diffusion de l'information dans les journaux ou circulaires officiels.

Pour les transporteurs étrangers, l'information devrait leur être fournie au franchissement des frontières ou aux gares de péage.

On ne dispose que de peu d'informations ou alors très limitées, sur le taux de respect des réglementations en vigueur mais on sait qu'il y a des infractions, notamment dans les tunnels dépourvus de contrôle permanent. A l'exception des tunnels qui franchissent une frontière où les douaniers assurent un contrôle permanent, le contrôle se limite, dans la plupart des cas, à des contrôles ponctuels (à supposer qu'il ne soit pas inexistant). Toutefois, aucun des pays enquêtés ne considère comme grave le problème des infractions ou de l'évasion.

Certains pays ont fait part de plans pour améliorer et modifier leurs règles et réglementations, de la façon suivante :

- Transfert de responsabilité d'un niveau fédéral à un niveau local, pour ce qui concerne la prise de décision et le contrôle.
- Exigences plus strictes d'une signalisation appropriée des réglementations en vigueur à chaque tunnel et sur les itinéraires de déviation possibles.
- Ajustement des réglementations en vigueur de façon à ne pas être en conflit avec les réglementations pour les routes à l'air libre.
- Les décisions d'interdire ou d'autoriser les marchandises dangereuses dans les tunnels devraient se fonder sur une comparaison quantitative des risques en appliquant la méthodologie EQR.
- Introduction d'obligations supplémentaires ou nouvelles en termes de mesures ou d'équipement de sécurité dans les tunnels qui autorisent le transport de marchandises dangereuses.
- Caractère uniforme des réglementations par exemple au niveau du pays, de la région, du comté, etc.
- L'expansion rapide du nombre des produits fabriqués par l'industrie chimique et leur complexité croissante rendent plus difficile la décision d'interdire ou non une matière. Le travail nécessaire pour conseiller les chargeurs et les fabricants de produits chimiques et pour faire respecter les réglementations s'en trouve accru.

La nécessité du projet a été mise en évidence par l'examen ci-dessus qui donne une synthèse utile du système réglementaire et des pratiques actuelles concernant le transport de marchandises dangereuses dans les tunnels. Il est vraisemblable que beaucoup de ces réglementations vont évoluer au cours des prochaines années à partir des recommandations tirées de la présente étude et de tout autre travail entrepris sur la question.

Chapitre 4

GROUPES HARMONISÉS DE CARGAISONS DE MARCHANDISES DANGEREUSES

Objectifs de l'harmonisation des réglementations

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, la réglementation relative au transport de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers varie d'un pays à l'autre et souvent d'un tunnel à l'autre, à l'intérieur d'un même pays. Ceci crée des difficultés pour les transporteurs. La planification des transports oblige à se référer à des réglementations différentes qui contiennent des listes différentes de cargaisons autorisées ou interdites dans les différents tunnels, à supposer que le transporteur soit même au courant de l'existence de telles interdictions. Les réglementations ne sont pas toujours bien respectées notamment parce qu'elles sont difficiles à comprendre et à contrôler.

L'harmonisation de la réglementation doit répondre aux objectifs suivants :

- Faciliter l'organisation du transport international et ainsi éliminer les entraves techniques au commerce et permettre la rationalisation de l'exploitation des transports au plan national.
- Améliorer la sécurité dans la mesure où une réglementation harmonisée sera beaucoup plus facile à respecter et à contrôler.

Ce chapitre a été établi à partir d'un document de travail qui a été soumis aux organismes intéressés responsables de la réglementation internationale du transport de marchandises dangereuses. En plus des membres des Comités OCDE et AIPCR, il a été diffusé au sous-comité d'experts sur le transport de marchandises dangereuses des Nations-Unies, au groupe de travail N°15 sur le transport routier de marchandises dangereuses de la Commission Économique pour l'Europe des Nations-Unies ainsi qu'au Comité Technique sur le transport de marchandises dangereuses de la Commission européenne.

Principes généraux du groupement

Disposer de réglementations harmonisées ne signifie pas que la même réglementation doit s'appliquer à tous les tunnels, ni même qu'un tunnel identique, en deux endroits différents, doit supporter la même réglementation. Le seul élément indispensable est que la réglementation soit partout exprimée de la même manière, ce qui signifie qu'elle doit renvoyer aux mêmes listes de cargaisons de marchandises dangereuses qui sont autorisées ou interdites.

Ces « listes » communes de cargaisons de marchandises dangereuses sont appelées « groupes de cargaisons de marchandises dangereuses » (ou plus simplement « groupes de cargaisons »). « Cargaison » renvoie non seulement à la nature de la marchandise transportée, mais également au fait

qu'elle soit transportée en vrac ou sous emballage ainsi qu'à l'éventuelle présence de marchandises dangereuses différentes à bord du même véhicule (« unité de transport » en termes réglementaires).

Le système proposé repose sur l'unicité de la définition des groupes de cargaisons de marchandises dangereuses pour tous les tunnels dans tous les pays. Le processus de prise de décision ne serait pas affecté par ces réglementations et resterait sous la responsabilité de l'autorité en charge du tunnel (le chapitre 7 contient des recommandations relatives au processus de décision). La décision toutefois donnerait lieu à une réglementation fondée sur les groupes de marchandises dangereuses définis au plan international.

L'idée générale est de répartir les diverses cargaisons de marchandises dangereuses en quelques groupes de sorte que toutes les cargaisons à l'intérieur d'un même groupe puissent être acceptées ensemble dans un même tunnel. Le nombre de groupes doit rester suffisamment faible pour que le système soit applicable.

Il est proposé un système comportant cinq groupes (A, B, C, D et E), classés par ordre de restrictions croissantes quant aux cargaisons qui peuvent traverser le tunnel. Le groupe A est le plus vaste : il recouvre toutes les cargaisons autorisées au transport routier, y compris les plus dangereuses. Le groupe E est le plus restrictif : il ne contient que les cargaisons pour lesquelles aucune signalisation particulière n'est exigée sur le véhicule, c'est-à-dire les moins dangereuses. Des restrictions encore plus sévères (absolument aucune marchandise dangereuse par exemple) ne sont pas possibles à mettre en œuvre pour les autorités : il n'est guère possible pour les autorités de différencier les cargaisons du groupe E (qui ne nécessitent pas de signalisation à l'extérieur du véhicule) des véhicules qui ne transportent pas de marchandises dangereuses, à moins de les arrêter pour vérification. Toutes les cargaisons du groupe E se retrouvent dans le groupe D, toutes celles du groupe D dans le groupe C, et ainsi de suite. Ces groupes peuvent servir de point de départ à des réglementations plus complexes, par exemple :

- Groupe C (6h à 22h) – Groupe A (22h à 6h).

Le groupe C est autorisé de 6h à 22h et le groupe A de 22h à 6h : ceci signifie que les cargaisons entrant dans le groupe A mais pas dans le groupe C ne sont autorisées qu'entre 22 heures et 6 heures, tandis que les cargaisons du groupe C le sont à tout moment.

- Groupe C (franchissement libre) – Groupe B (sous escorte).

Les cargaisons entrant dans le groupe A mais pas dans le groupe B sont interdites, les cargaisons entrant dans le groupe B mais pas dans le groupe C ne sont autorisées que sous escorte, les cargaisons entrant dans le groupe C peuvent franchir librement le tunnel.

Le système de groupes proposé

Risques principaux dans un tunnel

Interdire les marchandises dangereuses dans les tunnels alors qu'elles sont autorisées à l'air libre ne peut se justifier que si le risque d'accident majeur (par exemple impliquant de nombreuses victimes ou des dommages inacceptables pour le tunnel) est plus important dans le tunnel qu'à l'air libre. Ceci signifie que les marchandises dangereuses qui ne risquent de provoquer ni un nombre important de victimes ni des dégâts importants sur la structure ne doivent pas être prises en compte pour une telle décision (par exemple les liquides qui ne sont dangereux que par contact).

Le système proposé se fonde sur l'hypothèse que dans les tunnels il existe trois dangers majeurs susceptibles de provoquer un nombre important de victimes et éventuellement des dégâts importants sur la structure :

- Les explosions.
- Les fuites de gaz toxique ou de liquide toxique volatil.
- Les incendies.

On peut sommairement décrire de la manière suivante les principales conséquences de ces dangers et l'efficacité des mesures éventuelles de protection :

- Explosions importantes. On peut distinguer deux niveaux différents :
 - *Explosion « très importante »*, comme celle d'une citerne complète de GPL chauffée par un incendie (BLEVE – Explosion de vapeur en expansion provenant d'un liquide en ébullition – suivie d'une boule de feu, dite « bleve chaud ») mais d'autres explosions peuvent avoir des conséquences analogues.
 - *Explosion « importante »* comme celle d'une citerne complète d'un gaz comprimé non inflammable chauffé par un incendie (BLEVE sans boule de feu, dit « bleve froid »).

Une explosion « très importante » (« bleve chaud » ou équivalent) va tuer toutes les personnes présentes dans le tunnel ou dans une portion significative de celui-ci et infliger des dégâts importants à l'équipement du tunnel, voire à sa structure. Les conséquences d'une explosion « importante » (« bleve froid » ou équivalent) seront plus limitées, notamment les dommages provoqués à la structure du tunnel. Il n'y a en général pas de possibilité d'éviter l'explosion ni d'en atténuer les conséquences, surtout dans le premier cas.

- Relâchements importants de gaz toxique. Un relâchement important de gaz toxique peut résulter d'une fuite dans une citerne contenant un gaz toxique (comprimé, liquéfié, dissout) ou un liquide toxique très volatil. Elle va tuer toutes les personnes présentes près de la fuite et dans la zone où la ventilation (qu'elle soit naturelle ou mécanique) va pousser le gaz. Une partie du tunnel peut être protégée mais il n'est pas possible de protéger l'ensemble du tunnel, surtout dans les premières minutes qui suivent l'accident.
- Incendies importants. Selon la géométrie, le trafic et l'équipement du tunnel, un incendie important aura des conséquences plus ou moins lourdes allant de quelques victimes et des dégâts limités à plusieurs dizaines de victimes et des dégâts importants sur le tunnel.

L'ordre de présentation de ces dangers : explosion, fuite toxique (gaz ou liquide volatil), incendie correspond à l'ordre décroissant de gravité de leurs conséquences et à l'ordre croissant d'efficacité des mesures possibles de protection.

Description du système

A partir des hypothèses précédentes, il est proposé un système comportant cinq groupes (A, B, C, D et E), classés par ordre de restrictions croissantes quant aux cargaisons qui peuvent traverser le tunnel :

Groupe A	Toutes les cargaisons de marchandises dangereuses autorisées à l'air libre.
Groupe B	Toutes les cargaisons du groupe A à l'exception de celles susceptibles de provoquer une explosion très importante (« bleve chaud » ou équivalent).
Groupe C	Toutes les cargaisons du groupe B à l'exception de celles susceptibles de provoquer une explosion très importante (« bleve froid » ou équivalent) de provoquer une fuite très importante de toxique (gaz ou liquide très volatil toxique).
Groupe D	Toutes les cargaisons du groupe C à l'exception de celles susceptibles de provoquer un incendie important.
Groupe E	Pas de marchandises dangereuses (sinon celles pour lesquelles aucun marquage n'est exigé sur le véhicule).

On aurait en fait pu retenir un système avec six groupes pour différencier les risques liés à une explosion importante et ceux liés à une fuite importante de toxique. Toutefois, les « bleve froids » peuvent se produire avec n'importe quel gaz non inflammable comprimé ou liquéfié, transporté en vrac, y compris ceux qui sont toxiques. Pour cette raison, jointe au souci de limiter le nombre de groupes, on a jugé convenable de traiter dans le même groupe les fuites importantes de toxique et les explosions importantes (« bleve froids »).

Il existe plusieurs manières de décrire les groupes proposés qui correspondraient aux définitions ci-dessus. Le système de classification pour le transport le plus largement reconnu et le plus global est celui contenu dans les recommandations relatives au transport de marchandises dangereuses du Comité d'Experts des Nations-Unies. Toutefois, dans la mesure où ces réglementations-types sont conçues pour être multimodales, il est plus facile d'utiliser les réglementations régionales spécifiques au transport routier, fondées sur les réglementations-types ONU, qui sont les plus utilisées. Il s'agit de l'accord européen dit *Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR)*. Le tableau 4.1 reprend le système de groupes proposé.

Le tableau montre les marchandises dangereuses, par classe, qu'il est proposé d'autoriser, dans chaque groupe de cargaisons, qu'elles soient en vrac (*citernes/conteneurs citernes*) ou en colis (*colis, récipients, grands récipients pour vrac*). Il a été établi à partir des annexes de 1999 de l'ADR qui vont rester en vigueur jusqu'au 1^{er} janvier 2003. Il utilise les numéros de classe ADR (qui, le moment venu, seront remplacés par les numéros ONU d'identification des substances, à quatre chiffres) et il fait appel aux clauses de « quantités limitées » du marginal ADR 10 011 qui sont spécifiques au mode et donc un peu différentes des seuils de quantité limitée du chapitre 3.4 du règlement-type des Nations-Unies.

Pour les cargaisons comportant plusieurs marchandises dangereuses différentes dans la même unité de transport, on détermine les groupes auxquels appartient chacune des marchandises séparément, et on retient pour l'ensemble du chargement le premier de ces groupes dans l'ordre alphabétique.

Tableau 4.1. Groupes de cargaisons de marchandises dangereuses à utiliser dans les réglementations harmonisées des tunnels routiers

Classe	Groupe A	Groupe B	Groupe C	Groupe D	Groupe E
	Toutes les marchandises dangereuses autorisées au transport par l'ADR.	Toutes les marchandises dangereuses sauf celles avec un risque d'explosion très importante.	Toutes les marchandises dangereuses sauf celles avec un risque d'explosion très importante, risque de fuite importante de gaz ou liquide toxique, risque de BLEVE froid.	Toutes les marchandises dangereuses sauf celles avec un risque d'explosion très importante, risque de fuite importante de gaz ou liquide toxique, risque de BLEVE froid, risque d'incendie important.	Pas de marchandises dangereuses au-delà du seuil de l'ADR 10 011.
1	Toutes	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement.	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement.	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement.
2	Toutes	Gaz A, O, T, TC, TO, TOC en citernes et bouteilles Gaz F, TF, TFC en bouteilles exclusivement.	Gaz A, O et F en bouteilles exclusivement.	Gaz A, O et F en bouteilles exclusivement.	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement
3	Toutes	Toutes sauf 6° et 7°.	Toutes sauf 6° et 7° et 1°-5°, 31°-34° en citernes/conteneurs citernes.	Toutes sauf 6° et 7° et les substances en citernes/conteneurs citernes.	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement.
4.1	Toutes	Toutes sauf 21°-25°, 31°, 32°, 41°, 42°	Toutes sauf 21°-25°, 31°, 32°, 41°, 42°.	Toutes les substances GE II et III sauf 21°-25°, 31°-50°	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement.
4.2	Toutes	Toutes les substances des GE II et III en citernes/conteneurs citernes. Toutes les substances en colis.	Toutes les substances des GE II et III en citernes/conteneurs citernes. Toutes les substances en colis.	Toutes les substances des GE II et III en citernes/conteneurs citernes. Toutes les substances en colis.	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement.
4.3	Toutes	Toutes les substances des GE II et III en citernes/conteneurs citernes. Toutes les substances en colis.	Toutes les substances des GE II et III en citernes/conteneurs citernes. Toutes les substances en colis.	Toutes les substances des GE II et III en citernes/conteneurs citernes. Toutes les substances en colis.	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement.
5.1	Toutes	Toutes les substances des GE II et III en citernes/conteneurs citernes. Toutes les substances en colis.	Toutes les substances des GE II et III en citernes/conteneurs citernes. Toutes les substances en colis.	Toutes les substances des GE II et III en citernes/conteneurs citernes. Toutes les substances en colis.	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement.
5.2	Toutes	Toutes sauf 1°, 2°, 11° et 12°.	Toutes sauf 1°, 2°, 11° et 12°.	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement.	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement.
6.1	Toutes	N° 11°- 28°, 31°-36°, 41°-44°, 51°-68°, 71°-73° et 90° en citernes/conteneurs citernes et en colis.	Tous les items du groupe B en colis, GE II et III en citernes/conteneurs citernes.	Tous les items du groupe B en colis, GE II et III en citernes/conteneurs citernes.	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement.
6.2	Toutes	Items 3°, 4°.	Items 3°, 4°.	Items 2, 3, 4.	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement.

Tableau 4.1. **Groupes de cargaisons de marchandises dangereuses à utiliser dans les réglementations harmonisées des tunnels routiers (suite)**

Classe	Groupe A	Groupe B	Groupe C	Groupe D	Groupe E
7	Toutes	Toutes	Toutes sauf N° 2977 et 2978 ONU	Toutes sauf N° 2977 et 2978 ONU	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement
8	Toutes	Toutes	Substances des GE II et III en citernes/conteneurs citernes. Toutes les substances en colis	Substances des GE II et III en citernes/conteneurs citernes. Toutes les substances en colis	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement
9	Toutes	Toutes		Toutes sauf items 4 en citernes/conteneurs citernes	En dessous du seuil ADR 10 011 seulement

Légende : GE = groupe d'emballage ; A = asphyxiant ; C = corrosif ; F = inflammable ; O = oxydant ; T = toxique.

Note : Les citernes/conteneurs citernes et emballages vides non nettoyés devront être traités comme s'ils étaient remplis ou partiellement remplis.

Cohérence avec le modèle d'évaluation quantitative du risque (EQR) et avec le modèle d'aide à la décision (MAD)

Il est important d'assurer la cohérence entre le système de groupes et les modèles EQR et MAD :

- Le modèle EQR doit incorporer des scénarios d'accidents représentatifs de chacun des groupes ; si les groupes autorisés dans un tunnel changent, les scénarios pris en compte doivent être différents pour permettre une variation des indicateurs de risque produits par l'EQR et ainsi une discrimination entre groupes.

Le MAD doit traiter les résultats du modèle EQR (ainsi que d'autres données) de façon à proposer des décisions exprimées sous forme du groupe optimal de cargaisons à autoriser dans un tunnel. Le tableau 4.2 reprend la liste des cargaisons retenues pour le développement du modèle EQR (voir chapitre 5). Elles sont représentatives des cinq groupes décrits ci-dessus. Le MAD étudie les différents groupes susceptibles d'être autorisés dans le tunnel (voir chapitre 6).

Tableau 4.2. **Cargaisons représentatives de chaque groupe pour le modèle d'évaluation quantitative du risque**

Groupes de cargaisons	Cargaisons représentatives pour l'EQR
Groupe A	GPL en citerne et en bouteille ; dioxyde de carbone en citerne ; ammoniac/chlore ¹ en citerne ; acroléine en citerne et en bouteille ; essence en citerne ; PL sans marchandises dangereuses.
Groupe B	Dioxyde de carbone en citerne ; ammoniac/chlore ¹ en citerne ; acroléine en citerne et en bouteille ; essence en citerne ; GPL en bouteille ; PL sans marchandise dangereuse.
Groupe C	Essence en citerne ; GPL en bouteille ; acroléine en bouteille ; PL sans marchandises dangereuses.
Groupe D	GPL en bouteille ; acroléine en bouteille ; PL sans marchandises dangereuses.
Groupe E	PL sans marchandises dangereuses.

1. Le chlore est pris en compte dans les pays où son transport sur routes est autorisé en quantités appréciables.

Conclusions relatives au système de groupe des cargaisons de marchandises dangereuses

L'examen des réglementations nationales et internationales actuelles a clairement fait ressortir la nécessité d'harmoniser les réglementations relatives au transport de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers. Le système proposé vise non pas à classer les tunnels mais à fournir des listes communes de cargaisons de marchandises dangereuses (dénommées « groupes ») auxquelles feraient référence toutes les réglementations des tunnels. Le choix du ou des groupes à autoriser dans un tunnel incomberait à l'autorité responsable du tunnel.

Les groupes proposés sont le fruit d'une approche rationnelle des risques qui peuvent être induits par des marchandises dangereuses dans des tunnels. Ils sont cohérents avec les modèles d'Évaluation Quantitative du Risque et d'Aide à la Décision développés dans le cadre du projet, de sorte que ces modèles peuvent fournir des données et des propositions relatives au choix optimal du groupe à autoriser dans un tunnel donné.

Il est recommandé d'intégrer ce système de groupement aux accords internationaux et aux législations nationales qui régissent le transport routier de marchandises dangereuses de façon à réglementer le transport de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers. Les principes des groupes doivent être respectés pour préserver l'intégrité des modèles EQR et MAD. Il est toutefois envisagé que la bonne garde du système soit confiée aux Nations-Unies. Il faudrait réexaminer régulièrement l'affectation des substances de façon à pouvoir apporter les ajustements mineurs jugés nécessaires au vu d'éventuelles études complémentaires du modèle EQR. Ceci imposerait toutefois de s'assurer que toute modification du système de groupement est adoptée partout et en même temps.

Un élément essentiel du système est qu'il soit transparent et largement reconnu. Pour ce faire, chaque tunnel routier devrait faire l'objet d'une décision quant aux groupes de cargaisons autorisés à le franchir. En plus des avis réglementaires, des arrêtés locaux de péage, il est recommandé que chaque tunnel fasse l'objet d'une signalisation qui indique les groupes autorisés à le franchir. La mise en place de cette signalisation relève de la compétence des organismes qui gèrent les conventions internationales en matière de signalisation routière (par exemple la CEE-ONU pour l'Europe), organismes qui devraient être chargés du développement des panneaux correspondants. Une fois un tel système adopté, on peut s'attendre à ce que les cartes routières et autres systèmes d'information du conducteur reprennent également ces indications relatives aux groupes de cargaison autorisés dans les tunnels routiers, facilitant ainsi la tâche de planification des transporteurs.

Réglementer les tunnels routiers en utilisant un système de groupement de cargaisons du type de celui développé ci-dessus devrait également favoriser un meilleur respect de la réglementation. Non seulement les exploitants de tunnel et les transporteurs auront à leur disposition un régime simple et direct, accessible et aisément compréhensible, mais les autorités chargées du contrôle pourront réaliser des contrôles aléatoires aux approches des tunnels sans avoir à se familiariser avec des accords internationaux ou des arrêtés locaux complexes relatifs aux tunnels.

Chapitre 5

LE MODELE D'ÉVALUATION QUANTITATIVE DU RISQUE (EQR)

Le transport de marchandises dangereuses dans les tunnels implique des risques particuliers pour les usagers de la route, les structures physiques, l'environnement et les personnes vivant à proximité des tunnels ou des itinéraires de déviation. Les autorités en charge des transports doivent décider si le transport de marchandises dangereuses est ou non autorisé sur certains itinéraires. En cas d'autorisation, il faut décider de la manière la plus sûre et la plus commode de transporter ces marchandises. Les modèles d'évaluation quantitative du risque (EQR) peuvent aider les décideurs en fournissant des estimations du risque qui soient à la fois précises et objectives pour différents types de marchandises dangereuses, différents tunnels et scénarios de transport.

Description du problème

Le risque se caractérise par deux aspects :

- La probabilité d'occurrence d'un événement.
- Les conséquences de l'événement lorsqu'il se produit.

La quantification du risque est difficile du fait que les probabilités d'accidents de la circulation sont faibles (et celles d'un accident avec des marchandises dangereuses encore plus faibles). Toutefois, les conséquences d'un tel accident peuvent être considérables. De nombreux facteurs et variables influencent les probabilités et les conséquences des accidents impliquant des marchandises dangereuses à la fois à l'intérieur et à l'extérieur des tunnels. Même avec des connaissances d'expert il est donc difficile d'évaluer le risque pour l'ensemble des circonstances, environnements, conditions météorologiques, etc. Le calcul informatique est un outil indispensable pour développer une approche rationnelle et solide du problème.

Les modèles d'évaluation quantitative du risque sont utilisés depuis de nombreuses années pour estimer les risques associés aux mouvements de marchandises dangereuses pour différentes conditions de transport à l'air libre. Certains pays membres de l'OCDE (la Norvège, les Pays-Bas et la France dans une certaine mesure) ont également développé des modèles EQR pour les tunnels routiers. On ressentait toutefois le besoin d'un modèle complet pour traiter à la fois les tunnels et l'air libre. En raison de la complexité d'un tel modèle, une coopération internationale était la meilleure approche. Le résultat est un outil unique qui peut être utilisé dans tous les pays.

Finalité

La finalité du modèle EQR est de quantifier les risques dus au transport de marchandises dangereuses sur des itinéraires donnés d'un système routier. On peut effectuer la comparaison entre un itinéraire comprenant un tunnel et un itinéraire de substitution à l'air libre.

Le modèle EQR a été développé à partir des composants suivants :

- Des indicateurs.
- Des scénarios d'accident.
- L'évaluation de la probabilité d'accident.
- La détermination des conséquences physiques, des dommages pour les structures et pour l'environnement.
- L'évaluation des conséquences sur les êtres humains (sections à l'air libre et en tunnel).
- L'analyse d'incertitude/de sensibilité
- La validation.

La méthodologie du modèle EQR est la suivante :

- Choisir un petit nombre de marchandises représentatives.
- Sélectionner un petit nombre de scénarios d'accident représentatifs impliquant ces marchandises.
- Déterminer les effets physiques de ces scénarios (pour les sections à l'air libre et en tunnel).
- Déterminer les effets physiologiques de ces scénarios sur les usagers de la route et sur la population locale (tués et blessés).
- Prendre en compte les possibilités de s'échapper et de se mettre à l'abri.
- Déterminer les probabilités d'occurrence associées.

Indicateurs

Les conséquences d'un accident sont des tués, des blessés, la destruction de bâtiments et de structures et des dommages à l'environnement. Comme dans tout processus de modélisation, des indicateurs simplificateurs sont nécessaires pour décrire les effets du comportement du système. Le modèle EQR produit des indicateurs pour caractériser les aspects suivants du risque :

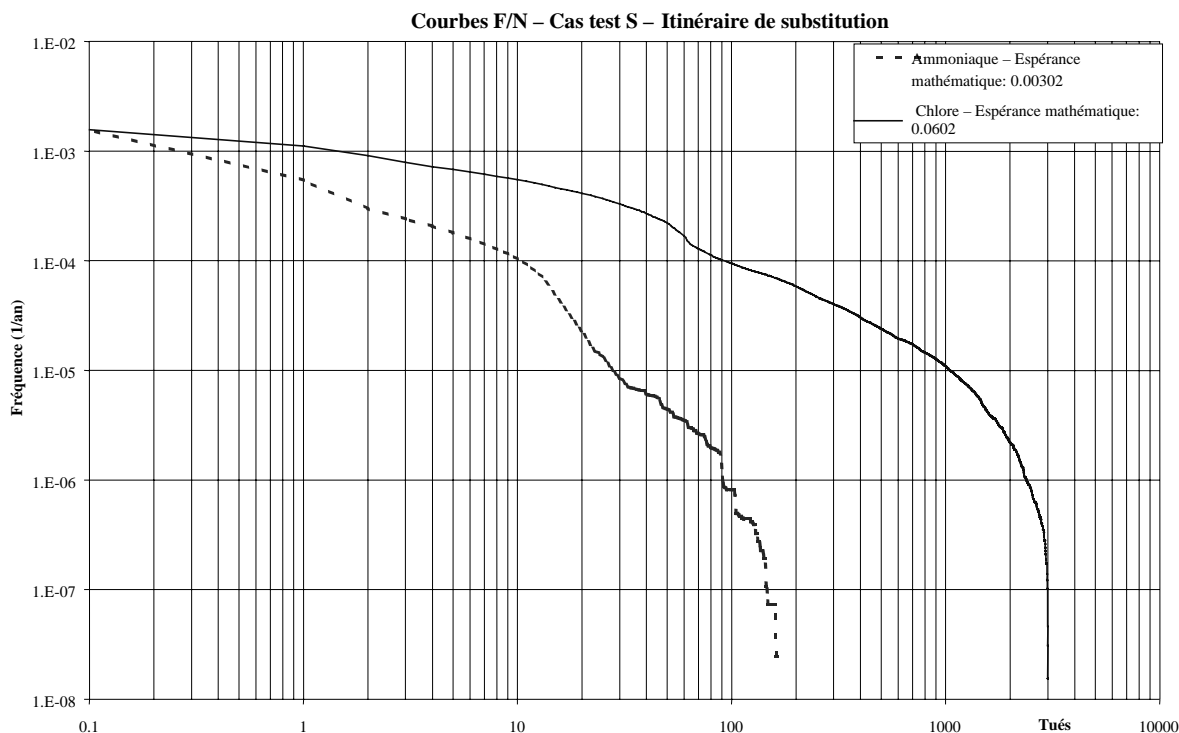
- Le risque sociétal.
- Le risque individuel.
- Les dommages pour les structures (estimations assez grossières).
- Les dommages pour l'environnement (estimations assez grossières).

Risque sociétal

Une manière courante de décrire le risque sociétal consiste à calculer des courbes F/N. Ces courbes F/N illustrent la relation entre fréquence et gravité des accidents. On représente en abscisse, sur une échelle logarithmique, le nombre de victimes x (tués, blessés). En ordonnée on représente les

fréquences annuelles correspondantes $F(x)$ d'occurrence des accidents qui font x victimes ou plus. Pour chaque situation donnée (population, trafic, trafic de marchandises dangereuses, itinéraire, météo, etc.) une courbe F/N représente le risque sociétal. A titre d'illustration, la figure 5.1 reprend les courbes F/N calculées sur le cas test du tunnel S.

Figure 5.1. **Cas test S : Application des conséquences d'une fuite d'ammoniaque et de chlore aux mêmes fréquences**

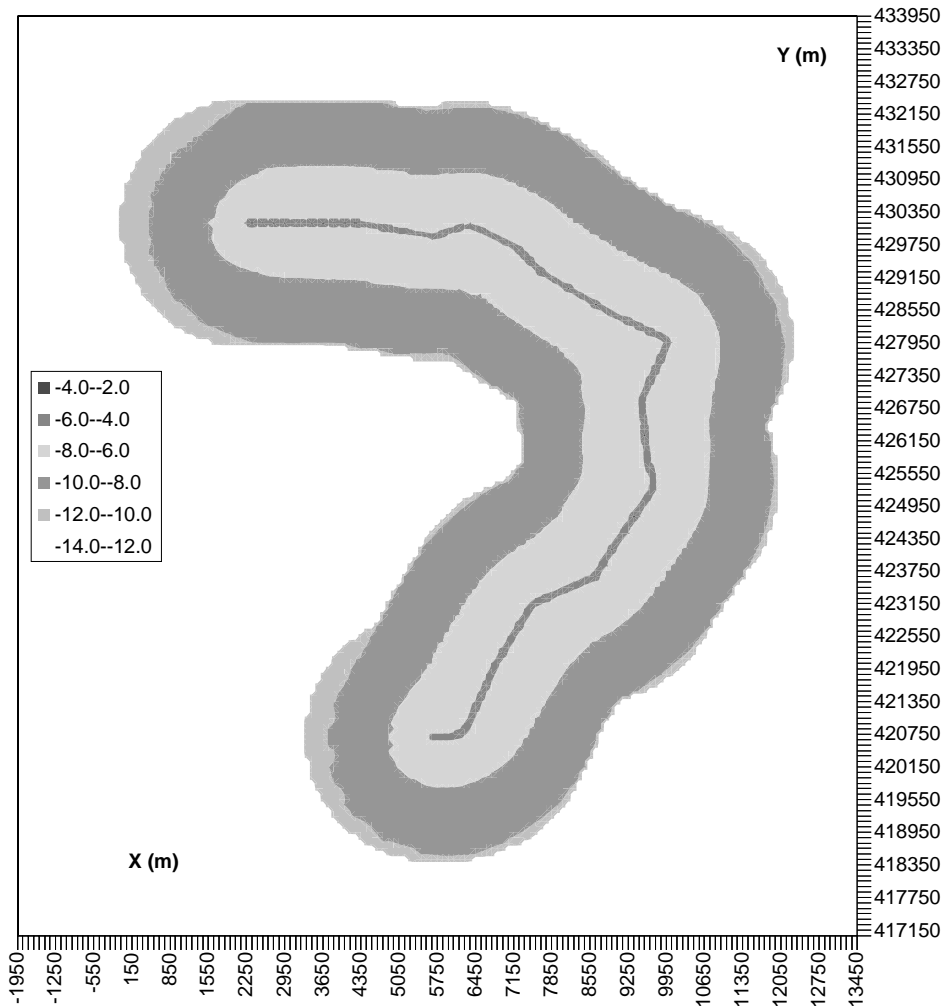


Une courbe F/N (la plus basse) correspond aux conséquences d'une fuite d'ammoniaque par une brèche de 50 mm de diamètre. L'autre courbe F/N correspond aux conséquences d'une fuite de chlore par une brèche de 50 mm de diamètre. Les mêmes fréquences d'occurrence d'un accident sont utilisées dans les deux exemples. Les deux courbes sont très différentes et les espérances mathématiques correspondantes diffèrent d'un facteur de 20. En raison de l'extrême importance de ses effets toxiques, le transport de chlore par la route est interdit dans certains pays (par exemple Autriche) ou il n'est permis qu'en faibles quantités (par exemple France, Canada).

Le risque individuel

L'indicateur de risque individuel renvoie au risque pour une personne appartenant à la population locale d'être tuée ou blessée suite à l'occurrence d'un accident. Le risque individuel est exprimé sous la forme d'une fréquence annuelle. Il pourrait également être exprimé en termes de temps de retour, c'est-à-dire le nombre moyen d'années entre deux accidents ayant les conséquences considérées (tué, blessé). Le modèle EQR calcule la répartition spatiale du risque. On peut établir des cartes en deux dimensions qui reprennent le risque individuel pour les alentours de l'itinéraire analysé, la figure 5.2 en donne un exemple. Le risque individuel peut être calculé pour les habitants ou pour les personnes travaillant dans la zone.

Figure 5.2. **Cas test D : Risque individuel dû au transport de marchandises dangereuses**
 Risque individuel – Cas test D – Itinéraire de substitution – Tous les scénarios



Note : Les valeurs dans la légende correspondent à l'exposant de 10 pour les fréquences individuelles de risque. Par exemple – 6 à – 4 représente les zones où la fréquence de décès (en restant en permanence en cet endroit) est comprise entre 10^{-4} et 10^{-6} .

Autres indicateurs

Le modèle EQR calcule en outre des estimations assez grossières des dommages pour les structures et pour l'environnement.

Scénarios d'accident

Une évaluation complète des risques impliqués dans le transport de marchandises dangereuses supposerait la prise en compte de toutes les sortes de matières dangereuses, de toutes les conditions météorologiques, de tous les accidents possibles, dimensions des brèches, du fait que les véhicules

sont complètement ou partiellement chargés et de nombreuses autres variables. Puisqu'il n'est pas possible de tenir compte de tout, il faut procéder à des simplifications.

Comme on le voit dans le tableau 5.1, on ne prend en compte qu'un nombre limité de scénarios. Deux scénarios concernent des incendies d'intensité moyenne et importante impliquant des poids lourds ne transportant pas de marchandises dangereuses. Ces scénarios constituent un risque grave dans les tunnels. Les autres scénarios impliquent des marchandises dangereuses. Les scénarios sont sélectionnés pour représenter les différents groupes de marchandises dangereuses (voir chapitre 4) et ont été choisis pour permettre l'examen de différents effets graves : surpression, effet thermique et toxicité.

Tableau 5.1. Principales caractéristiques des 13 scénarios retenus

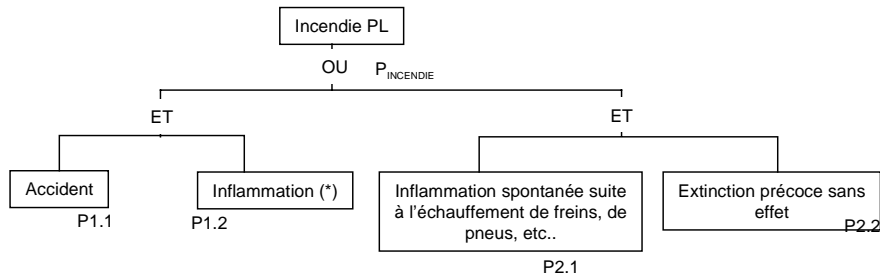
Scénario n°	Description	Capacité de la citerne	Taille de la brèche (mm)	Débit massique de fuite (kg/s)
1	Incendie PL 20 MW	-	-	
2	Incendie PL 100 MW	-	-	
3	BLEVE de GPL en bouteille	50 kg	-	
4	Feu de nappe d'essence	28 tonnes	100	20.6
5	Explosion d'un nuage de vapeur d'essence (VCE)	28 tonnes	100	20.6
6	Relâchement de chlore	20 tonnes	50	45
7	BLEVE de GPL en citerne	18 tonnes	-	
8	Explosion d'un nuage de vapeur (VCE) de GPL en citerne	18 tonnes	50	36
9	Feu chalumeau de GPL en citerne	18 tonnes	50	36
10	Relâchement d'ammoniaque	20 tonnes	50	36
11	Relâchement d'acroléine en citerne	25 tonnes	100	24.8
12	Relâchement d'acroléine en bouteilles	100 litres	4	0.02
13	BLEVE de dioxyde de carbone en citerne (sans inclure les effets toxiques)	20 tonnes	-	-

Légende : BLEVE = explosion de vapeur en expansion provenant d'un liquide en ébullition ; PL = poids lourd ; GPL = gaz de pétrole liquéfié.

Chaque scénario se fonde sur un arbre des événements différent. La figure 5.3 montre l'arbre des événements pour les scénarios 1 et 2, incendie de poids lourds en l'absence de marchandises dangereuses. A partir de cet arbre des événements, on a pu dériver l'équation des probabilités ci-après :

$$P_{Incendie} = P_1 + P_2 = (P_{1.1} + P_{1.2}) + (P_{2.1} + P_{2.2})$$

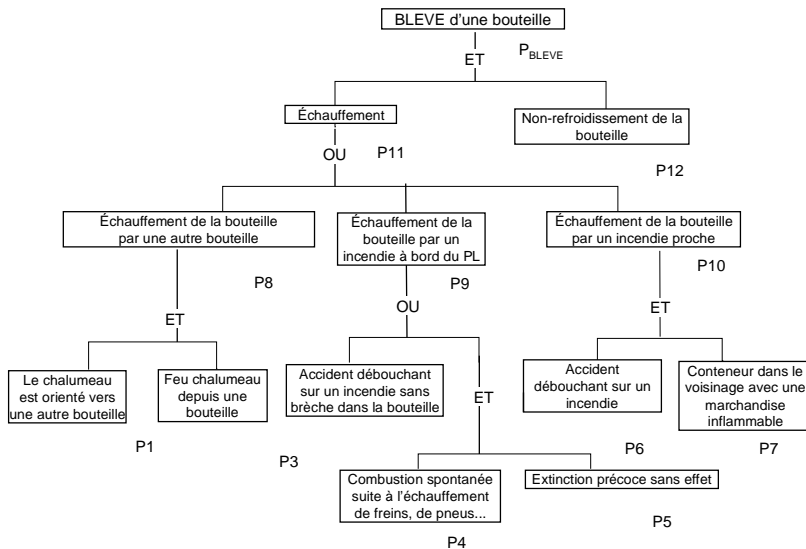
Figure 5.3. Arbre des événements pour le scénario PL sans marchandises dangereuses



(*) Dans le cas d'un accident, l'inflammation peut démarrer dans le PLMD lui-même ou dans d'autres véhicules impliqués dans l'accident.

La figure 5.4 montre l'arbre des événements pour le scénario de BLEVE de GPL en bouteille (50 kg). De tels arbres des événements et les équations de probabilité correspondantes sont produits pour tous les scénarios examinés.

Figure 5.4. Arbre des événements pour un BLEVE de GPL en bouteilles de 50 kg



Évaluation de la probabilité d'accident

Le but est de déterminer les fréquences d'occurrence des scénarios choisis selon la section de l'itinéraire envisagée. Il faut pour cela diviser l'itinéraire en sections homogènes, en termes d'éléments de la route, trafic, marchandises dangereuses transportées, environnement et conditions météorologiques. Cette tâche incombe à l'utilisateur du modèle qui doit également fournir et préparer les différentes entrées du modèle.

Les calculs liés au scénario sont répartis en quatre étapes :

1. Détermination des taux d'implication dans des accidents pour les poids lourds (en présence et en l'absence de marchandises dangereuses) par million de véhicules kilomètres parcourus pour différents pays, zone urbaine/rase campagne, chaussées bidirectionnelle/séparées, itinéraires en surface/tunnel, état superficiel favorable/défavorable des chaussées le long de l'itinéraire.
2. Détermination du trafic de poids lourds et du trafic de marchandises dangereuses sur les différentes sections de l'itinéraire considéré. Le trafic entré par l'utilisateur est traduit en un nombre de véhicules-kilomètres annuel.
3. Proportion d'accidents de poids lourds qui peuvent déboucher sur des incendies de 20 MW et 100 MW. Proportion de transports de marchandises dangereuses de chaque type qui peuvent déboucher sur un scénario ou plus.
4. Taux du scénario une fois qu'un accident est survenu.

Les étapes 1, 3 et 4 sont exécutées par le modèle. Pour l'étape 2, les valeurs doivent être entrées par l'utilisateur. Pour l'étape 3, les valeurs peuvent également être entrées par l'utilisateur mais des valeurs par défaut sont définies dans le modèle.

Il n'est pas exclu que les scénarios puissent se produire en l'absence d'un accident au sens propre, à la suite par exemple d'une surchauffe de freins. De tels incidents ainsi que les accidents sont dénommés « événements ». Il faut être vigilant car il peut exister des bases de données différentes pour les événements et pour les accidents. Pour le modèle, les scénarios impliquant des poids lourds transportant des marchandises dangereuses ont été pris comme une partie des événements concernant des marchandises dangereuses (voir figure 5.5). Les résultats des calculs sont repris dans le tableau 5.2.

Figure 5.5. Répartition possible des différents types d'accidents/événements

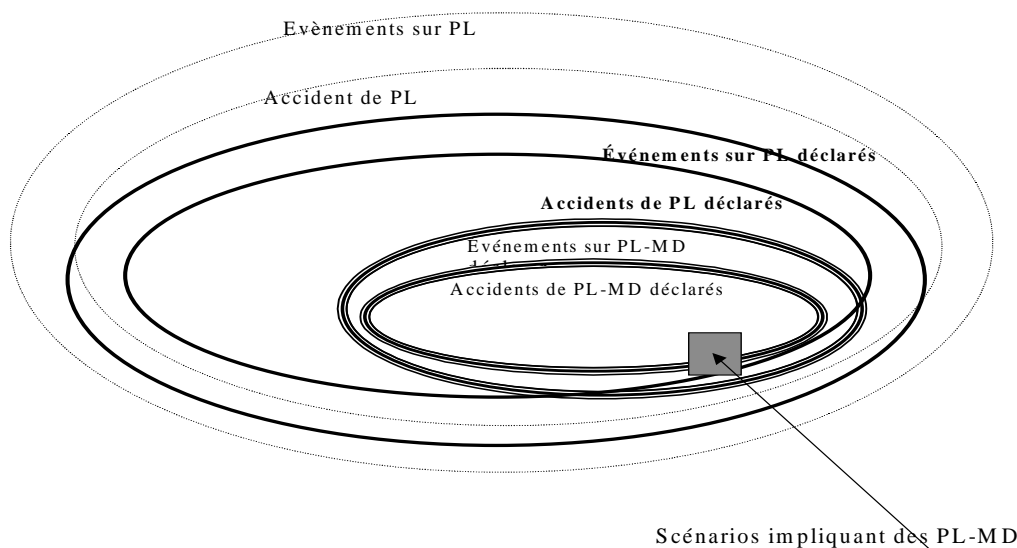


Tableau 5.2. Taux des scénarios PL – marchandises dangereuses une fois qu'un événement s'est produit

	Scénario	Type de MD	Chargement	Air libre en milieu urbain	Air libre en rase campagne	Tunnel urbain	Tunnel en rase campagne
Scénario	Caractéristiques du scénario			Taux du scénario			
BLEVE de propane en bouteille	3	2	Faible	4.3E-04	8.0E-04	1.7E-03	5.1E-03
Feu de nappe d'essence	4	3	Important	2.7E-03	4.5E-03	2.8E-03	2.0E-02
Explosion de nuage de vapeur d'essence (VCE)	5	3	Important	2.7E-04	4.5E-04	2.8E-04	2.0E-03
Relâchement de chlore	6	1	Important	3.1E-02	5.4E-02	3.1E-02	5.4E-02
BLEVE de propane en citerne	7	2	Important	2.3E-04	4.2E-04	2.8E-04	2.0E-03
Explosion de nuage de vapeur de propane en citerne	8	2	Important	2.3E-04	4.2E-04	2.8E-04	2.0E-03
Feu chalumeau de propane en citerne	9	2	Important	2.3E-03	4.2E-03	2.8E-03	2.0E-02
Relâchement d'ammoniaque	10	1	Important	3.1E-02	5.4E-02	3.1E-02	5.4E-02

Détermination des conséquences physiologiques, des dommages pour les structures et pour l'environnement

En dehors des scénarios dans lesquels des fragments sont susceptibles, dans certains cas, d'être projetés sur de grandes distances, la traduction des conséquences physiques en conséquences physiologiques est généralement effectuée au moyen de fonctions de type probit.

Pour les fuites toxiques à l'air libre, les effets physiques sont évalués à l'aide d'un modèle de dispersion de gaz dense. Dans les tunnels, le « pré-conditionneur » calcule la progression d'un nuage toxique le long du tunnel en fonction de la localisation de l'accident et des caractéristiques du tunnel.

Les explosions de nuage de vapeur à l'air libre sont évaluées en déterminant la géométrie du nuage lorsqu'il se forme et la masse inflammable qu'il représente comparée à la masse totale libérée. Dans les tunnels, on utilise un modèle simple qui permet le calcul du niveau de surpression généré par l'embrasement du nuage inflammable.

Les calculs de feu de nappe à l'air libre sont fondés sur les effets de radiation pour des feux de nappe importants. Dans les tunnels après avoir évalué les mouvements de fumée de l'incendie, il est possible de calculer les distances d'effet en tenant compte de la toxicité des émanations et de la radiation thermique de la couche de fumée.

Un BLEVE correspond à deux phases : une expansion physique une fois un récipient perforé (effets de surpression et de missile) et une réaction chimique si les marchandises dangereuses sont inflammables. Ces deux types de conséquences sont couverts par les calculs.

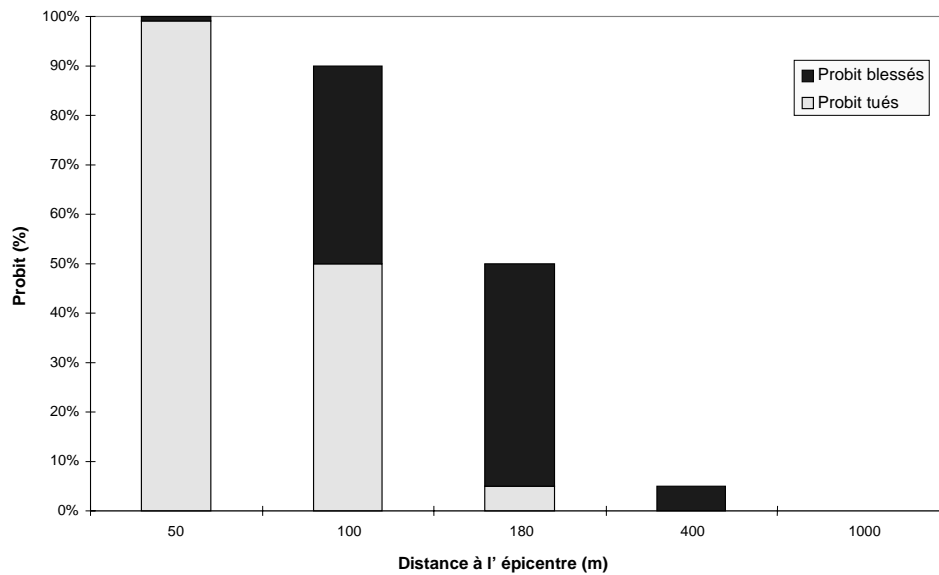
Détermination des blessures

En raison du fait que le pourcentage de blessés ne diminue pas nécessairement lorsque la distance augmente, comme c'est le cas avec les tués (figure 5.6), il a été décidé de produire des courbes F/N pour :

- Les tués seulement
- Les tués plus les blessés

Les espérances mathématiques pour les blessés seulement peuvent être calculées à partir de ces courbes F/N. Ceci a été fait pour les incendies, les explosions et les fuites toxiques.

Figure 5.6. **Exemple d'évolution des pourcentages en fonction de la distance pour les tués et les blessés**



Domages pour la structure

En général, les structures sont des constructions qui supportent des charges et leur défaillance risque de menacer sérieusement l'intégrité d'un tunnel. Dans un tunnel creusé, il s'agit simplement du revêtement du tunnel. Pour un tunnel en tranchée couverte, la structure générale inclut des éléments de soutien comme les murs latéraux et les couvertures.

Le tableau 5.3 identifie quatre catégories de dommages qui sont prises en compte dans le modèle EQR.

Tableau 5.3. **Catégories de dommages**

Scénario de dommage	
1	Structure du tunnel (effondrement ou problèmes d'intégrité structurelle).
2	Structures internes de génie civil dont la chaussée (l'intégrité générale n'est pas remise en cause).
3	Dommage pour l'équipement protégé.
4	Dommage pour l'équipement non protégé, l'éclairage par exemple.

Le tableau 5.4 résume les caractéristiques des matériaux couramment utilisés relatives aux températures auxquelles se manifeste une diminution provisoire et irréversible de résistance.

Tableau 5.4. **Synthèse des caractéristiques de perte de résistance des matériaux couramment employés dans les structures**

Matériau	Perte provisoire de résistance	Perte irréversible de résistance
Béton dense	La réduction devient significative à 300°C et il subsiste 50 % de la résistance à 600°C	La perte de résistance résiduelle devient significative à 300°C
Béton léger	La réduction devient significative à 500°C et il subsiste 50 % de la résistance à 750°C	La perte de résistance résiduelle devient significative à 500°C
Béton armé et précontraint	La résistance commence à diminuer à 150°C et chute de 50 % à 450°C	La résistance résiduelle commence à diminuer à 150°C et chute de 50 % à 400°C
Structures en acier	La résistance commence à diminuer à 200°C et chute de 50 % à 500-600°C	La résistance résiduelle commence à diminuer à 300°C

Le tableau 5.5. résume les critères critiques de défaillance thermique pour les différents matériaux utilisés pour l'équipement des tunnels.

Tableau 5.5. **Températures de défaillance représentatives pour des équipements auxiliaires de tunnel**

Type d'équipement	Température de « défaillance » (°C)
Thermoplastiques (boîtes, couvercles d'interrupteur, gaines de câbles)	Point de fusion 180°C
Chemin de câbles en « MODAR »	Température maximum de service environ 100°C
Alliages d'aluminium (fixation des éclairages)	Réduction significative des propriétés à 300°C
Acier (appliques de soutien et fixations)	Réduction significative des propriétés à 500°C
Câbles	250°C pour les câbles d'éclairage du circuit auxiliaire et final et les câbles de communication, 1 000°C pour les câbles de l'éclairage de secours
Éclairage	La température ne doit pas dépasser 40°C

Estimation des coûts de remise à neuf

Les coûts de remise à neuf dépendent du type de tunnel, de sa taille, de sa localisation, de ses particularités de construction et du niveau de dégradation provoqué par l'accident. En outre, les coûts de la main d'œuvre et des matériaux varient d'un pays à l'autre. Pour parer aux incertitudes de la méthodologie, le coût de remise à neuf est présenté sous forme de pourcentage de l'estimation du coût en capital de construction d'un nouveau tunnel obéissant aux mêmes spécifications (tableau 5.6).

Tableau 5.6. Répartition des coûts déclarée pour les tunnels creusés et en tranchée couverte

Postes de coût	Tunnel creusé	Tranchée couverte
Génie civil :	77.5 %	81 %
Creusement	40.5 %	10 %
Revêtement du tunnel	24 %	52.5 %
Génie civil du tunnel	5 %	10.5 %
Autres	5 %	5 %
Équipements mécaniques et électriques :	22.5 %	19 %
Installations d'éclairage	4.5 %	4.0 %
Ventilation	2 %	2 %
Électricité	4.5 %	7 %
Système du tunnel	15.2 %	13 %
Autres	8 %	8 %

Pour le logiciel EQR, il a été décidé d'utiliser une répartition différente des coûts, à partir d'un ensemble analogue de postes de coût.

Tableau 5.7. Hypothèse de répartition des coûts en pourcentage de défaillance pour les tunnels creusés et en tranchée couverte

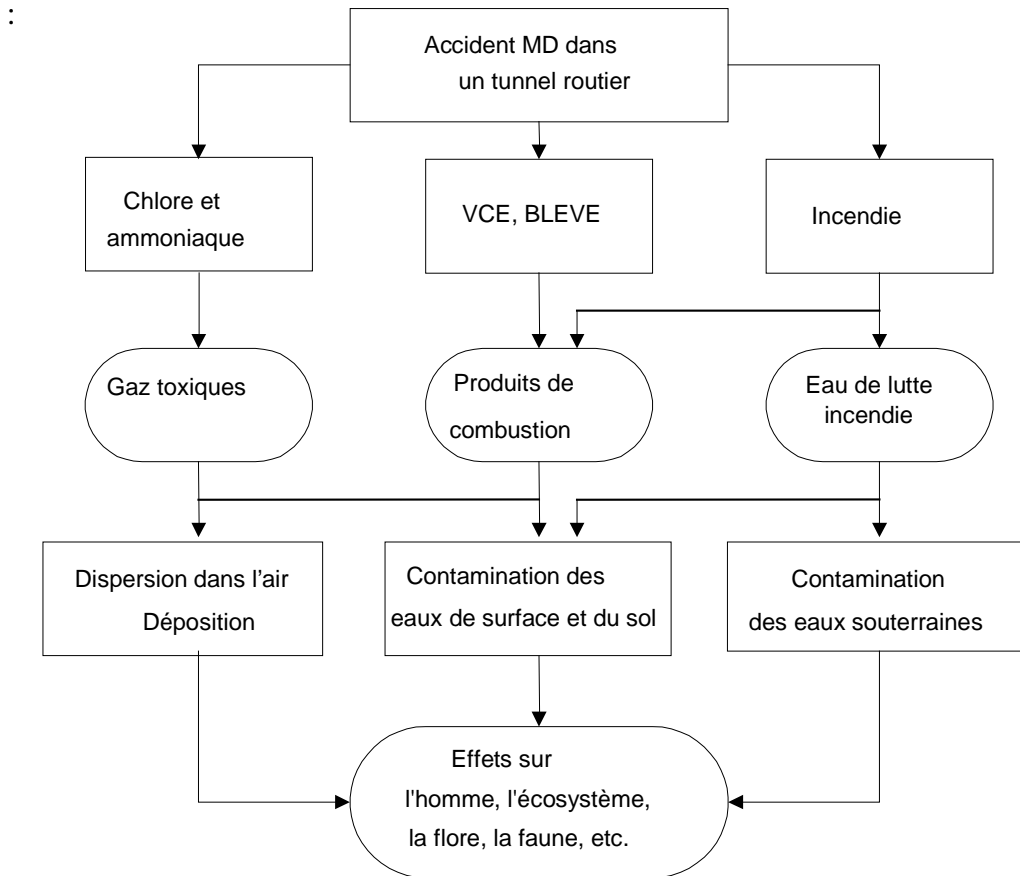
Postes de coût	Catégorie de dommage	Tunnel creusé %	Tranchée couverte %
Creusement	4	50	15
Revêtement du tunnel	4	25	60
Structures internes de génie civil dont la chaussée	3	12.5	12.5
Ventilation	2	6.5	6.5
Équipement de sécurité	2	2	2
Éclairage	1	3	3
Équipement de circulation	1	1	1

L'estimation du coût total de remise à neuf est obtenue en ajoutant le coût des dommages pour chaque poste concerné. Ce coût est obtenu en multipliant les facteurs de coût donnés dans le tableau 5.7 par un facteur de pondération fondé sur la proportion de la longueur de tunnel affectée dans chaque catégorie de dommage.

Effets sur l'environnement

Les principaux effets sur l'environnement des accidents de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers en termes de contamination de l'atmosphère, de l'eau et des sols sont indiqués dans la figure 5.7.

Figure 5.7. Composantes de la pollution environnementale



Si le modèle prend en compte les effets sur l'environnement, les indicateurs utilisés sont de nature plus qualitative que les autres indicateurs utilisés dans le modèle. L'évaluation complète des impacts sur l'environnement dépasse la portée de ce modèle. La classification des marchandises dangereuses ne s'effectue en général pas en se fondant sur leurs effets environnementaux (par exemple, un déversement important de lait pourrait dans certains cas avoir de graves conséquences pour l'environnement). Une évaluation quantitative complète des conséquences pour l'environnement des accidents impliquant des marchandises dangereuses serait extrêmement complexe et d'un intérêt limité. Les indicateurs d'impact environnemental sont résumés dans le tableau 5.8.

Tableau 5.8. Indicateurs d'impact sur l'environnement (gravité : négligeable, faible, moyenne, forte)

Scénario	Facteurs clés ayant un impact sur la gravité			
	Aucun	Drainage Système ¹ de retenue	Contrôle ² de l'eau pour la lutte contre l'incendie	Flore et faune ou système aquatiques adjacents et limités
Incendie PL, 20 MW	Faible - Dispersion dans l'air d'une quantité importante de produits de combustion	-	Négligeable	Négligeable
Incendie PL, 100 MW	Moyenne - Dispersion dans l'air d'une quantité importante de produits de combustion. - Quantité importante d'eau utilisée contre l'incendie	-	Faible	Négligeable
BLEVE bouteille GPL	Négligeable - Dispersion dans l'air d'une faible quantité de produits de combustion	-	-	Négligeable
Feu de nappe d'essence	Forte - Dispersion dans l'air d'une quantité importante de produits de combustion. - Déversement d'hydrocarbure liquide nocif. - Quantité importante d'eau utilisée contre l'incendie.	Forte	Forte	Négligeable
Explosion de nuage de vapeur d'essence (VCE)	Moyenne - Dispersion dans l'air d'une quantité importante de produits de combustion. - Déversement d'hydrocarbure liquide nocif.	Forte	-	Négligeable
Relâchement de chlore	Forte - Quantité importante. - Déversement d'un liquide très nocif.	Faible	-	Négligeable
BLEVE GPL en citerne	Faible - Dispersion dans l'air d'une quantité importante de produits de combustion	-	-	Négligeable
Explosion de nuage de vapeur de GPL en citerne	Faible - Dispersion dans l'air d'une quantité importante de produits de combustion	Faible	-	Négligeable
Feu chalumeau de GPL	Moyenne - Dispersion dans l'air d'une quantité importante de produits de combustion. - Quantité importante d'eau utilisée contre l'incendie.	-	Faible	Négligeable
Relâchement d'ammoniac	Forte - Quantité importante. - Déversement d'un liquide très nocif.	Faible	-	Négligeable

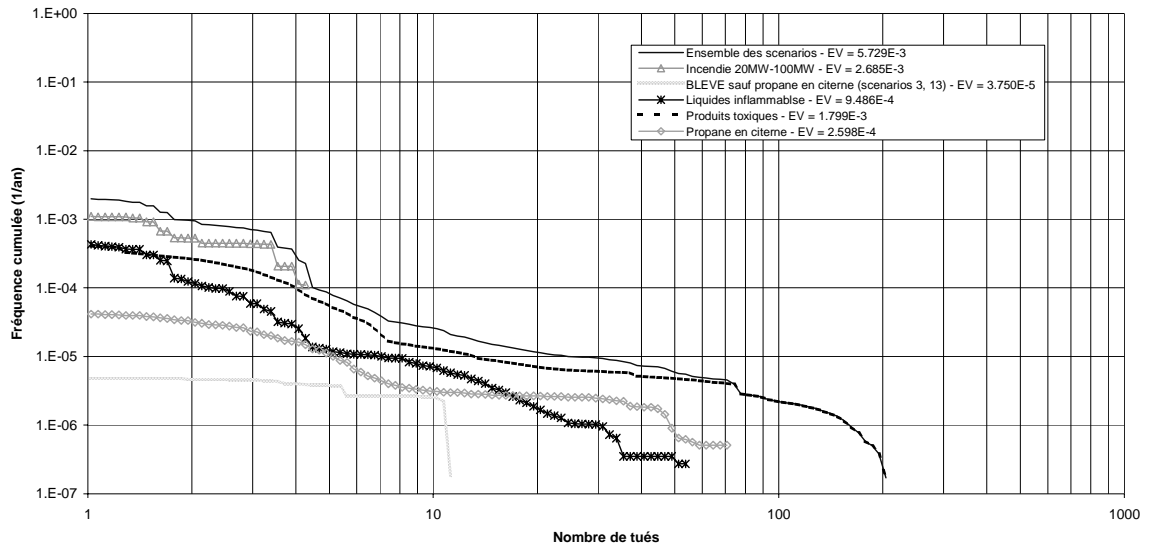
1. On suppose que les systèmes de drainage n'ont en général pas la capacité de retenir toute l'eau utilisée pour lutter contre l'incendie en cas d'incendie important.

2. On suppose que les mesures de contrôle destinées à minimiser le volume d'eau utilisée pour combattre l'incendie (c'est-à-dire, réponse rapide des services d'urgence, utilisation de digues, etc.) sont efficaces.

Évaluation des conséquences dans les sections à l'air libre et en tunnel

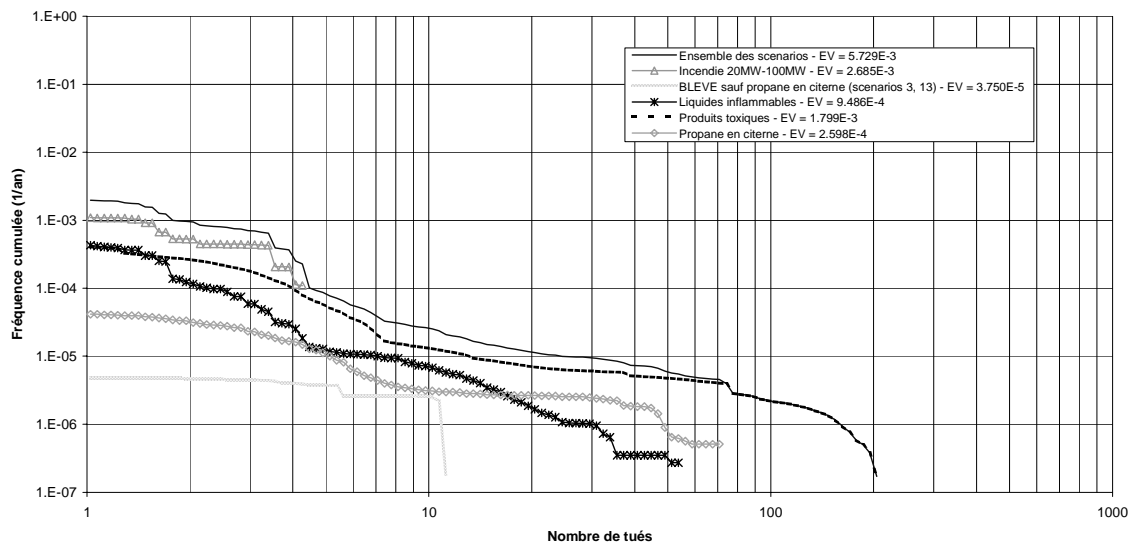
Des calculs étendus fournissent les données de risque individuel et les courbes F/N pour les scénarios retenus et pour différents types de transport. A titre d'exemple on donne les résultats correspondant au cas test C (figures 5.8 et 5.9).

Figure 5.8. Courbes F/N – Cas test tunnel C



EV = valeur attendue (*expected value*) = tués (+ blessés) par an.

Figure 5.9. Courbes F/N – Cas test C : Itinéraire de substitution

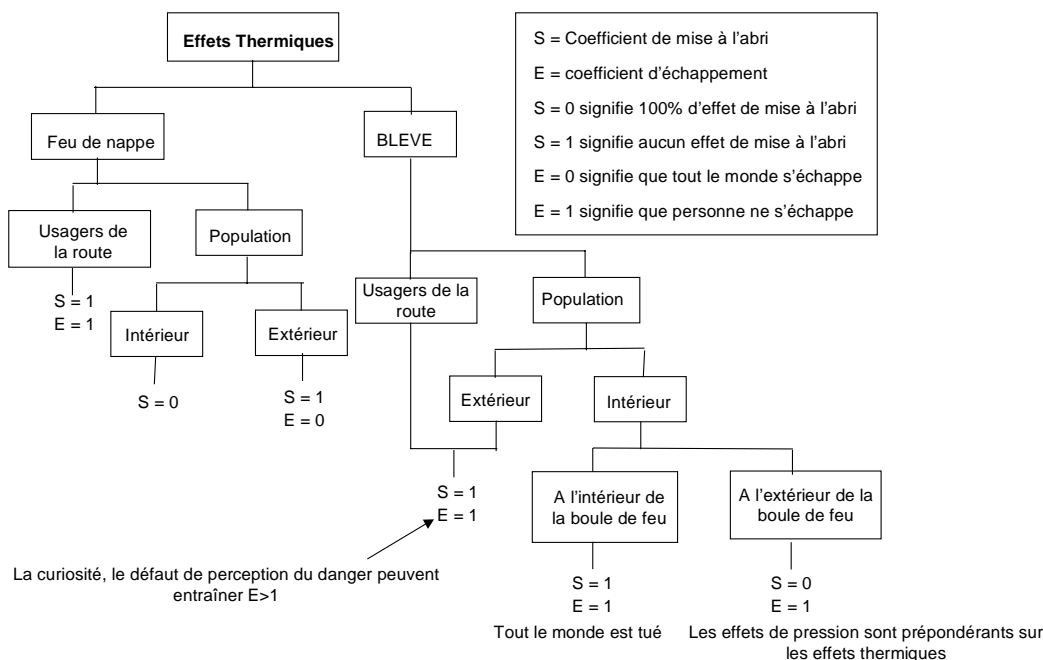


EV = valeur attendue (*expected value*) = tués (+ blessés) par an.

Possibilités de s'échapper ou de se mettre à l'abri

Le modèle réalise les calculs relatifs à l'échappement/mise à l'abri pour les situations aussi bien à l'air libre qu'en tunnel. La figure 5.10 résume les types de cas qui peuvent se rencontrer. Pour les principes d'évacuation des tunnels, on prend en compte le temps de mise en mouvement (ce concept est expliqué dans le chapitre 7) et les temps de réponse des occupants.

Figure 5.10. Les effets de mise à l'abri et les possibilités de s'échapper pour les effets thermiques à l'extérieur d'un tunnel



Analyse de sensibilité

L'analyse déterministe implique des incertitudes. Il faut tester différents paramètres pour évaluer leur influence. Les figures 5.11 à 5.13 donnent les résultats de ces tests. Processus de validation

Cette étape était nécessaire dans le développement du modèle EQR pour tester le modèle développé par des personnes non impliquées dans le processus de construction mais familiarisées avec le comportement du système, l'évaluation du risque et les modèles informatiques. Les pays suivants ont été impliqués dans le processus de validation : Autriche, France, Norvège, Pays-Bas, Suède et Suisse. Des cas tests ont été choisis pour des tunnels en milieu urbain, en rase campagne, un ou deux tubes, dans le rocher, en tranchée couverte, différents environnements routiers, différents systèmes de ventilation et une grande diversité de conditions de circulation.

Figure 5.11. Résultats de l'analyse de sensibilité
(variation dans la vitesse de déplacement)

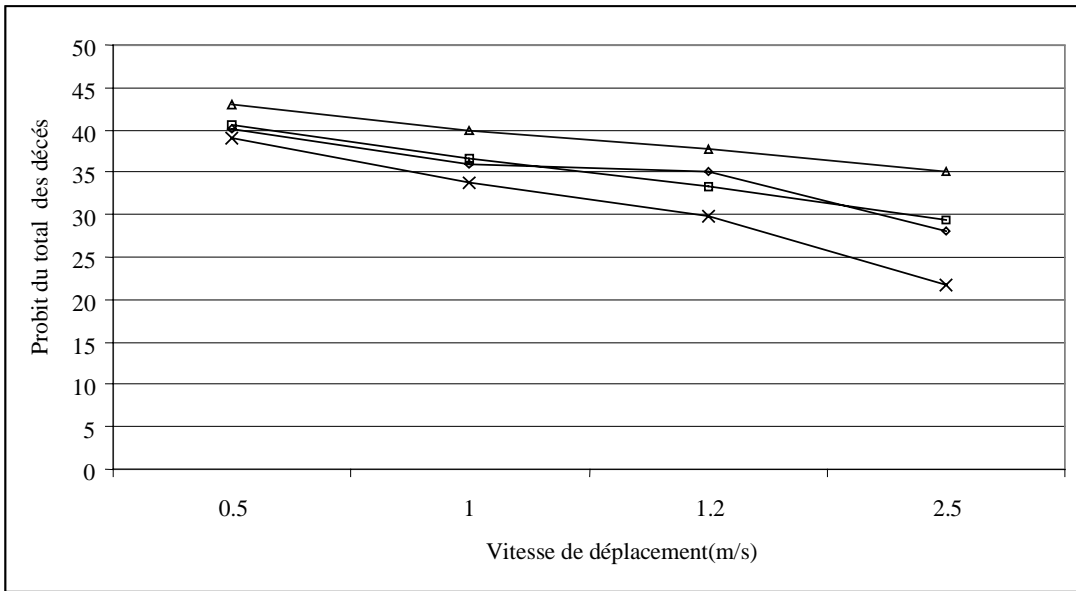


Figure 5.12. Résultats de l'analyse de sensibilité
(variation dans les systèmes d'alerte : meilleur scénario possible)

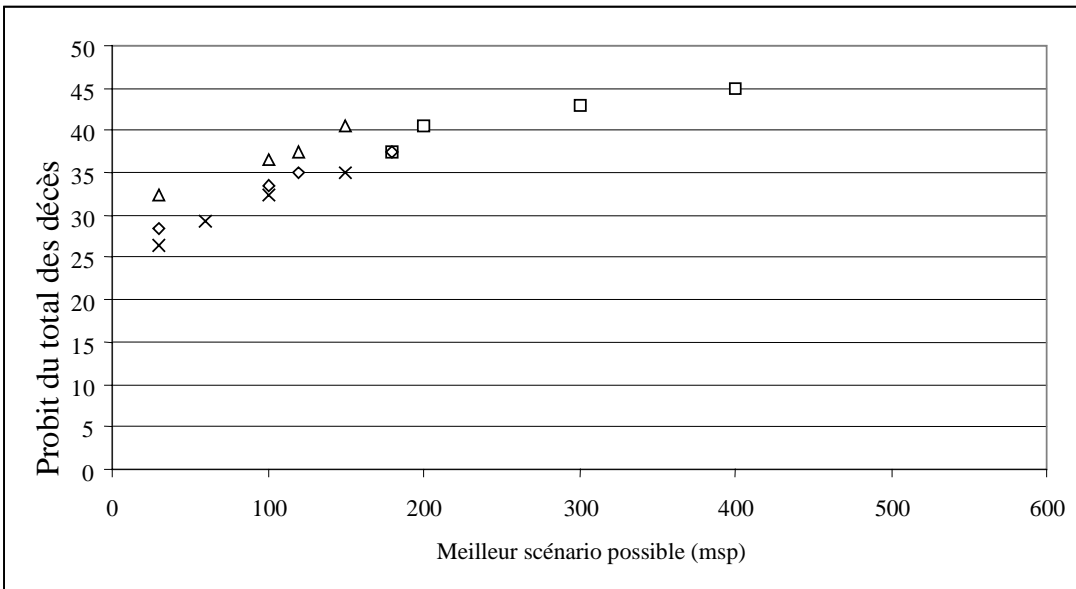
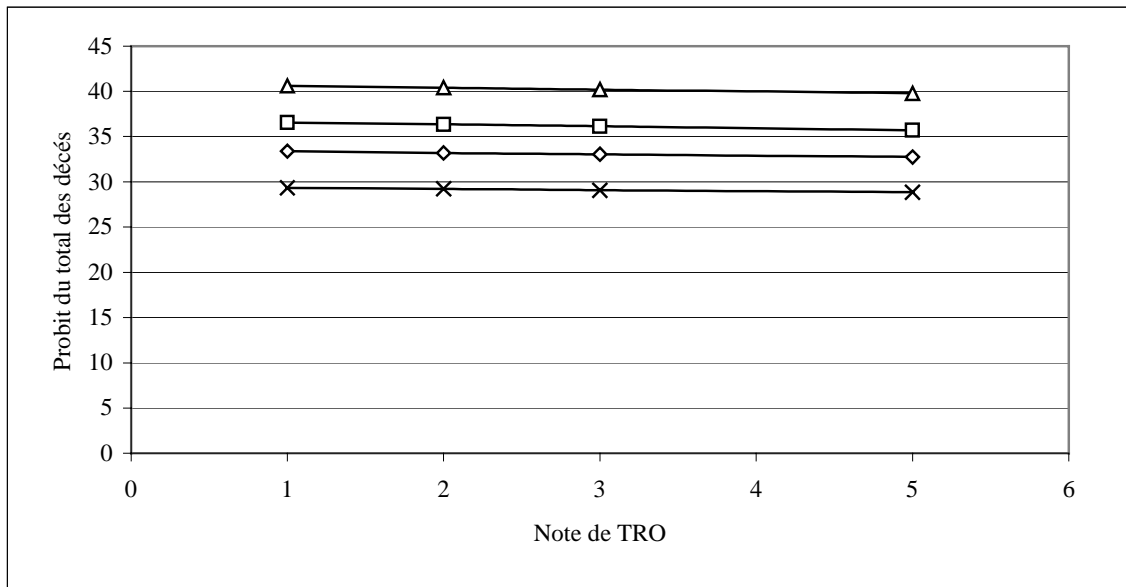


Figure 5.13. Résultats de l'analyse de sensibilité
(variation du temps de réponse individuel de l'occupant, note de TRO)



Le groupe de validation a tenu cinq réunions au cours desquelles les expériences ont été échangées et documentées. A l'issue de chaque réunion, les responsables du développement du modèle ont révisé celui-ci pour éliminer les bogues et résoudre les problèmes identifiés au cours des séances de validation. Les analyses de sensibilité ont été menées avec les dernières versions du modèle pour confronter les résultats des calculs du modèle avec des connaissances d'expert. La phase de validation n'est que la première étape du processus en cours d'utilisation pratique du modèle développé, processus qui devrait se poursuivre à l'avenir. Le groupe de validation a approuvé le modèle avec des conditions supplémentaires :

Le logiciel EQR devrait être recommandé dans les pays Membres de l'OCDE pour le calcul du risque dans un tunnel isolé, le calcul et la comparaison des risques collectifs des itinéraires par le tunnel et de substitution et la détermination de la distribution en 2D des risques individuels le long d'un itinéraire.

Pour surmonter ces problèmes pour les nouveaux utilisateurs, il faudrait fournir une aide en ligne. Il est recommandé :

- D'établir une base de données, accessible par Internet, qui reprenne toutes les expériences avec le modèle EQR. Cette base de données devrait contenir les résultats de toutes les applications nationales disponibles du modèle.
- D'établir un réseau d'utilisateurs confirmés des modèles qui puissent être contactés lorsque les usagers sont incapables de résoudre les problèmes par eux-mêmes.

Ce recueil d'expériences et de résultats peut constituer une base à partir de laquelle poursuivre l'amélioration du logiciel EQR et du manuel de référence. L'objectif est un processus continu d'amélioration du logiciel EQR en impliquant tous les utilisateurs et leurs expériences.

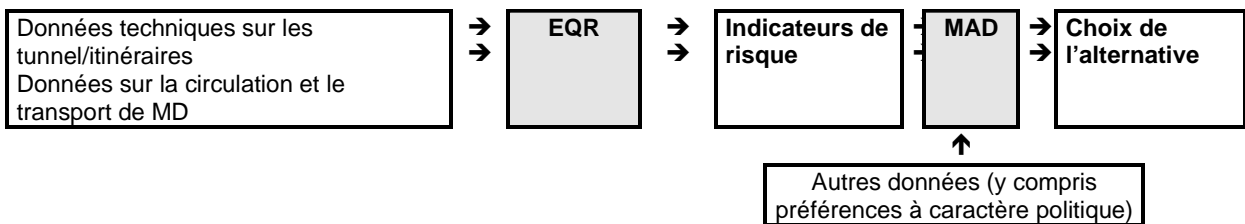
Chapitre 6

LE MODELE D'AIDE A LA DECISION (MAD)

Le rôle du modèle d'aide à la décision (MAD) est d'offrir aux décideurs une assistance pour déterminer quels sont les groupes de marchandises dangereuses qui peuvent être autorisés dans un tunnel donné. La décision doit être fondée sur les résultats du modèle d'évaluation quantitative du risque (EQR) décrit dans le chapitre précédent. Une condition préalable au MAD est que le décideur agisse en prenant en considération la sécurité des usagers de la route et de la population locale le long aussi bien de l'itinéraire avec tunnel que des itinéraires de substitution pris en compte.

Le MAD utilise les résultats du modèle EQR et d'autres informations fournies par le décideur comme le montre la figure 6.1. Les entrées de caractère politique contiennent des données qui ne sont pas de nature scientifique ou technique mais plutôt de nature subjective, politique. Il peut s'agir de la pondération de l'importance pour le décideur des tués comparé aux blessés, soit en termes monétaires soit sous la forme de simples coefficients de pondération. Il peut également s'agir des valeurs monétaires du temps perdu par les usagers de la route ou des pertes liées à la fermeture du tunnel suite à un accident.

Figure 6.1. Structure de l'étude et du processus de décision



Notes : EQR : modèle d'évaluation quantitative du risque ; MAD : modèle d'aide à la décision.

Afin d'offrir la meilleure base possible d'aide aux décisions relatives au transport de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers, deux guides différents sont présentés dans ce chapitre. Il s'agit :

- D'un outil informatique qui a été développé spécifiquement en vue d'aider aux décisions concernant les groupes de cargaisons de marchandises dangereuses à autoriser dans les tunnels. Le MAD offre à l'utilisateur le choix entre trois méthodologies différentes qui, dans une certaine mesure, exigent des entrées différentes en matière de préférences.
- Des recommandations. Elles font la synthèse des différents critères qui devraient être pris en compte lors d'une décision, et donnent des conseils quant à la manière d'évaluer les différentes décisions possibles par rapport à ces critères (entre autres, en utilisant les résultats de l'EQR). Pour parvenir à une décision, il faut pondérer les critères les uns par rapport aux

autres. Une fois réunies toutes les données nécessaires, la manière de prendre la décision est laissée au choix du décideur.

Définition du problème constitué par la décision

Le problème de décision doit être défini en termes de : *i*) objectif d'ensemble ; *ii*) qui doit décider et quel est le point de vue du décideur ; *iii*) description des problèmes objets de la décision en termes d'alternatives possibles ; et *iv*) quel processus de décision doit être utilisé.

L'objectif d'ensemble est d'établir un cadre pour évaluer les risques et décider des réglementations relatives au choix d'itinéraire des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers ou ailleurs. Les réglementations sont fondées sur les groupes proposés au chapitre 4.

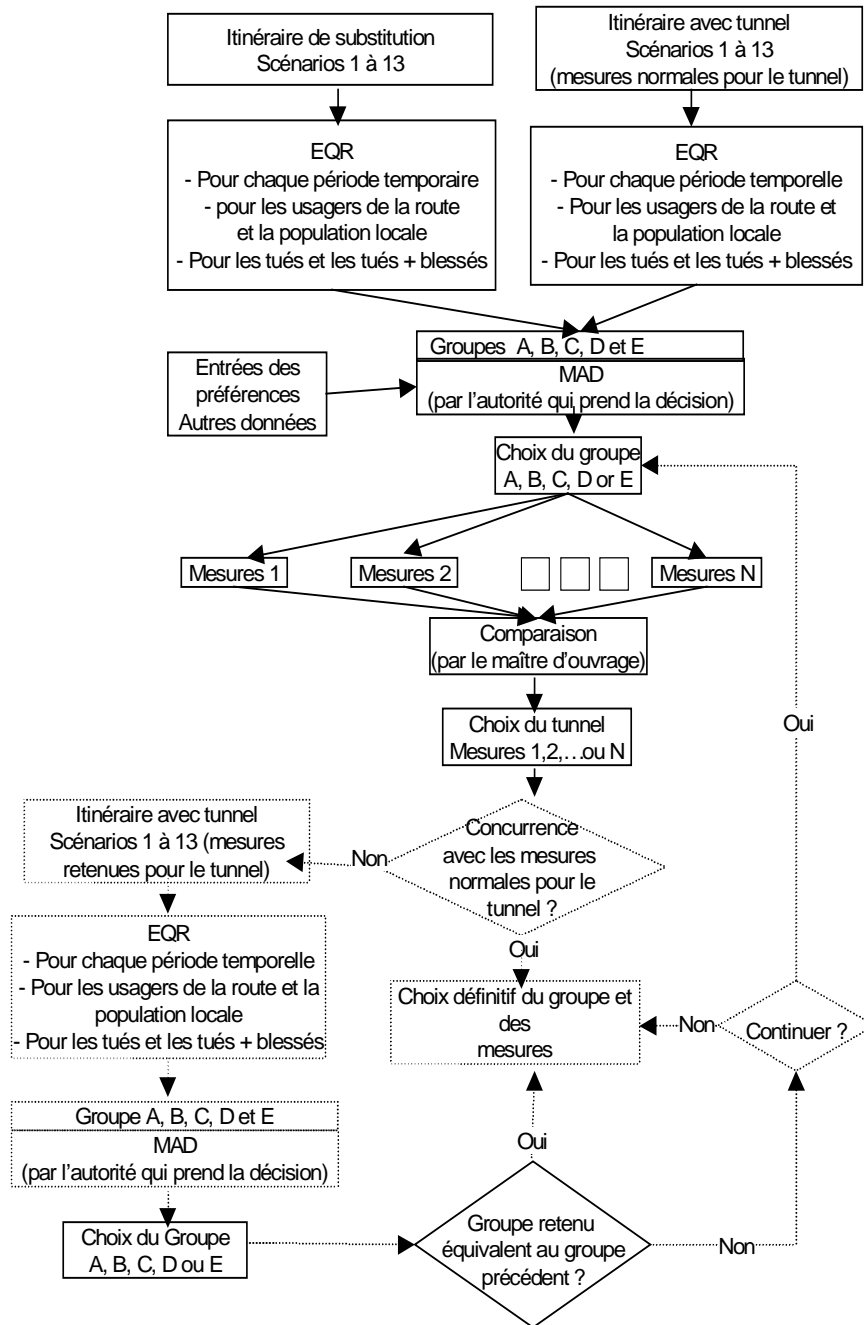
La formulation du problème de décision dépend du point de vue du décideur. Dans ce cas, le décideur devrait être une autorité capable de prendre en compte l'objectif dans son intégralité. C'est-à-dire que le décideur devrait agir en prenant en considération l'ensemble de la zone géographique comprenant le tunnel, le ou les itinéraire(s) de substitution et la région affectée par les conséquences de la circulation sur ces itinéraires.

Pour bâtir un MAD, il est nécessaire de clairement définir le problème de décision. Pour un tunnel donné, le problème essentiel est le choix des groupes de cargaisons de marchandises dangereuses qui devraient être autorisés dans le tunnel. Ce choix impose au trafic prohibé d'emprunter un itinéraire de déviation (l'itinéraire de substitution). Par conséquent, la décision doit prendre en compte les risques sur l'itinéraire du tunnel liés aux cargaisons de marchandises dangereuses qui y sont autorisées ainsi que les risques sur l'itinéraire de déviation liés aux cargaisons qui sont interdites dans le tunnel.

Une seconde décision concerne le choix de mesures éventuelles de réduction du risque à mettre en œuvre dans le tunnel. Il est clair que cette seconde décision est liée à la première : les mesures de réduction du risque peuvent affecter les cargaisons qui peuvent être acceptées dans un tunnel ; réciproquement, les marchandises dangereuses autorisées affectent le choix des mesures. Combiner dans une analyse unique tous les choix de réglementation et toutes les mesures optimisées de réduction du risque serait très complexe (de nombreuses itérations de l'EQR seraient nécessaires) et ainsi inapplicable en pratique. La figure 6.2 schématise le processus de décision :

- On fait tourner le modèle EQR pour l'itinéraire avec tunnel et celui de substitution en appliquant des mesures normales de réduction du risque. Des itérations séparées sont nécessaires pour chacune des périodes considérées, pour les usagers de la route et la population locale et pour les tués et les tués plus blessés. Ceci correspond à un maximum de 24 itérations du modèle EQR.
- Les résultats de ces itérations du modèle EQR sont combinés avec les groupes A à E par l'outil MAD. L'autorité qui prend la décision choisit ensuite la réglementation avec l'aide du MAD en prenant en compte l'entrée préférence politique et les autres informations nécessaires, fournies par le décideur.

Figure 6.2. Le processus de décision proposé



- A l'étape suivante, les mesures de réduction du risque sont optimisées par le maître d'ouvrage du tunnel en tenant compte de la réglementation choisie. Si les mesures optimisées diffèrent notablement de celles utilisées dans la première itération du modèle, un nouveau cycle des modèles EQR et MAD peut s'avérer nécessaire pour vérifier la pertinence du choix de la réglementation. Si la concordance n'est pas suffisante entre les mesures optimisées et les mesures normales utilisées, on fait tourner le modèle EQR pour l'ensemble optimisé de mesures et on détermine le groupe optimal pour le tunnel. On obtient ainsi la décision définitive si on trouve un groupe optimal équivalent au groupe précédemment retenu.

- Si tel n'est pas le cas, il faut répéter l'optimisation des mesures sur la base du dernier groupe retenu. Il n'y a pas de garantie que le processus de décision proposé converge vers une décision globale optimale si le problème de décision s'avère présenter une forte sensibilité (décision globale optimale signifie une décision optimale à l'égard à la fois des mesures pour le tunnel et du groupe). Viser une optimisation globale imposerait de faire tourner le modèle EQR au départ pour tous les ensembles de mesures pour le tunnel et que la décision relative aux mesures de réduction soit directement intégrée dans le MAD, en prenant également en compte le coût de mise en œuvre de la mesure.

De manière générale, le MAD ne devrait prendre en compte des critères pour le tunnel que si les mêmes critères le sont pour l'itinéraire de substitution et réciproquement. Par exemple, les dommages matériels au tunnel ne devraient être pris en compte que s'il est également possible d'estimer les dommages matériels à l'air libre. Dans de tels cas, il faudrait également prendre en compte les dommages matériels pour les usagers de la route et pour la population locale.

Les entrées du MAD

Les indicateurs de risque de l'EQR fournissent des données d'entrée importantes pour les différents critères susceptibles d'être pris en compte dans le MAD. Il est toutefois possible de considérer d'autres données d'entrée en vue d'évaluer les différentes réglementations possibles par rapport aux objectifs du décideur. Certains objectifs possibles du décideur, intégrés dans le MAD, sont énumérés ci-après :

- La sécurité (recouvre les tués et les tués plus blessés en raison d'accidents éventuels sur l'itinéraire avec tunnel et l'itinéraire de substitution, avec une distinction entre les usagers de la route et la population locale).
- Les dépenses directes (recouvre l'investissement et le coût d'exploitation liés aux mesures de réduction du risque dans le tunnel ainsi que d'éventuels coûts supplémentaires pour le transport de marchandises dangereuses).
- Les inconvénients pour les usagers de la route (temps perdu lors des travaux de réparation consécutifs à un accident dans le tunnel).
- L'impact sur l'environnement (lié à un accident sur l'itinéraire avec tunnel ou de déviation, si on peut l'apprécier).
- Les nuisances pour la population locale (impact sur l'environnement dû au trafic de marchandises dangereuses, à l'exclusion des conséquences d'un accident éventuel, mais en incluant éventuellement l'impact psychologique).
- Les dommages matériels (liés à d'éventuels accidents).

Outre l'information directe sur les critères descriptifs de chaque objectif ci-dessus, des entrées de nature politique sont nécessaires dans le MAD de façon à assurer la cohérence des décisions avec les valeurs importantes pour le décideur. Une entrée indispensable de type préférence est la pondération des divers critères pris en compte dans le MAD. La pondération se fait de manière différente selon le type de MAD choisi. Une autre entrée de type préférence, importante mais facultative, pourrait être l'aversion au risque, par exemple de savoir si un accident unique faisant 100 morts est jugé comme moins acceptable que 100 accidents faisant chacun un mort.

Enquête et choix des méthodologies/outils d'aide à la décision

Depuis de nombreuses années, on étudie, au plan théorique, les méthodologies d'aide à la décision et elles sont appliquées dans de nombreux domaines. Des outils informatiques sont disponibles, aussi a-t-on réalisé une enquête suivie d'une évaluation sur les outils reconnus d'aide à la décision. Trois grandes catégories ont été examinées, traitant toutes des objectifs multiples et éventuellement contradictoires :

- L'analyse bayésienne est une procédure transparente fondée sur des axiomes définis rationnellement. Elle peut être modélisée en utilisant des arbres de décisions ou réseaux bayésiens (diagrammes d'influence). Les objectifs multiples sont pondérés sous la forme d'une fonction d'utilité commune. C'est l'alternative qui maximise l'espérance mathématique de cette fonction (c'est-à-dire l'utilité attendue) qui est retenue.
- L'analyse multi-attributs (également dite multi-critères) évalue les variantes pour chacun des objectifs. Diverses méthodes nécessitent une pondération directe ou indirecte de ces objectifs pour obtenir une note globale des options. Ces méthodes sont entre autres la procédure analytique de hiérarchisation (AHP), la technique de notation multi-attributs simple (SMART) et la méthode du produit pondéré. La méthode appelée SMART fait appel à une sommation pondérée. C'est l'option avec la note la plus élevée qui est retenue.
- L'analyse coûts-bénéfices recouvre deux approches différentes. L'une est très similaire à l'analyse bayésienne et elle pondère ainsi les coûts attendus contre les bénéfices attendus. L'autre, classique, valorise les options d'une manière purement économique non probabiliste et compare la valeur actualisée des coûts et des bénéfices pour les différentes options.

L'enquête a conclu qu'il n'y a pas de raccourci pour parvenir à une prise de décision rationnelle. Il faut pondérer les différents objectifs les uns vis-à-vis des autres, éventuellement contradictoires, aussi délicate que puisse paraître la quantification de ces objectifs et de leurs poids. Dans les cas où on n'utilise pas d'outil formalisé d'aide à la décision, la pondération se fait instinctivement. Le choix d'une méthodologie se résume essentiellement à la question de savoir si la conversion des objectifs sur une échelle unique se fait implicitement ou explicitement. En outre, des informations importantes concernant les différents objectifs individuels risquent d'être perdues si l'on choisit la conversion implicite. Aussi a-t-on conclu qu'il fallait, dans la mesure du possible, appliquer les transformations directes utilisées dans l'approche bayésienne.

Le programme informatique MAD

Le MAD utilise les éléments suivants – dénommés critères (ou attributs) – dans l'évaluation du trafic de marchandises dangereuses :

- Les conséquences des accidents de marchandises dangereuses sur l'itinéraire avec tunnel.
 - Tués et blessés parmi les usagers de la route.
 - Tués et blessés parmi la population.
 - Dommages au tunnel.
 - Temps passé par les usagers et kilométrage supplémentaire en raison de la déviation de l'ensemble du trafic à la suite d'un accident de marchandises dangereuses.

- Perte de revenu d'exploitation pendant que l'itinéraire avec tunnel est fermé.
- Dommages pour l'environnement.
- Les conséquences des accidents de marchandises dangereuses sur l'itinéraire à l'air libre :
 - Tués et blessés parmi les usagers de la route.
 - Tués et blessés parmi la population.
 - Dommages pour l'environnement.
- Les conséquences de la déviation du trafic de marchandises dangereuses vers l'itinéraire à l'air libre :
 - Temps passé par les transports de marchandises dangereuses et kilométrage supplémentaires en raison de la déviation.
 - Perte de revenu d'exploitation en raison de la déviation.

Les critères sont de nature très différente et seront normalement mesurés avec des unités différentes. Toutefois, pour déterminer le groupe le plus avantageux à autoriser dans le tunnel, le MAD facilite une comparaison quantitative des changements dans les critères.

Trois approches ont été mises en œuvre dans le MAD (COWI, 2000) :

- L'approche bayésienne.
- L'approche SMART.
- L'approche SMART agrégée.

Le MAD Bayésien

L'approche bayésienne repose essentiellement sur la sommation actualisée de tous les critères. Ainsi, les décès et les blessés, les dommages au tunnel, les inconvénients pour les usagers et les dommages pour l'environnement sont convertis en une unité monétaire. En sommant l'espérance mathématique des coûts actualisés de tous les critères, on obtient une valeur qui mesure les conséquences globales du groupe sélectionné. Les valeurs ainsi obtenues pour chaque groupe fournissent une base simple à partir de laquelle est décidé le groupe optimal, c'est-à-dire celui qui correspond à l'espérance mathématique du coût la plus faible.

La conversion des critères en unités monétaires impose de déterminer des prix. On les appelle *préférences* et ils recouvrent le coût équivalent d'un décès ou d'un blessé, des déviations du trafic (intentionnelles ou découlant d'un accident) et des dommages pour l'environnement. Il est clair que les préférences peuvent être assez délicates à décider mais la quantification directe assure la transparence dans la prise de décision.

Le MAD SMART

L'approche SMART est fondée sur la comparaison individuelle de chacun des critères. Le critère est transformé en un nombre sans dimension (rang) compris entre 0 et 1.0 en divisant la valeur obtenue pour le critère par la plus faible valeur obtenue pour ce critère en examinant toutes les options de groupe. On utilise le rapport inverse de façon que la plus faible valeur du critère corresponde au rang 1.0 et que les valeurs élevées correspondent à un rang inférieur à 1.0. Les rangs sont multipliés par des coefficients de pondération spécifiques à l'utilisateur et la somme pour tous les critères donne une note combinée pour le groupe. Le groupe qui obtient la note maximale est considéré comme le meilleur.

Dans cette approche SMART, les seules entrées provenant de l'utilisateur sont donc les poids relatifs à appliquer au rang sans dimension des différents critères.

Le MAD SMART agrégé

Afin de réduire le nombre de coefficients de pondération à introduire dans la méthodologie SMART, on a introduit une version agrégée de la méthodologie SMART. On utilise des combinaisons pertinentes de critères (par exemple les tués et les blessés sont combinés en « conséquences pour les individus ») et ce sont ces critères agrégés qui sont soumis à classement.

La combinaison des critères individuels en critères agrégés est fondée sur la sommation actualisée (c'est-à-dire les préférences introduites dans le cadre de la méthodologie bayésienne) et la méthode représente ainsi un hybride entre les deux méthodologies bayésienne et SMART.

La contrainte du MAD relative au risque individuel

Le nombre moyen annuel de décès représente le risque de mortalité et les critères associés sont inclus dans le problème d'optimisation. Les approches bayésienne, SMART et SMART agrégée sont en outre fondée sur la comparaison de l'espérance mathématique de l'utilité ou la note des options examinées et ne renvoient ainsi qu'à des niveaux relatifs de risque. En mesurant le risque individuel, le nombre de décès est relié aux personnes exposées au risque. Afin de s'assurer que le niveau de risque acceptable pour l'individu n'est pas franchi, on calcule également le risque individuel et on vérifie si les valeurs correspondantes dépassent des niveaux maximaux spécifiés. Ces niveaux sont considérés comme des contraintes pour le problème d'optimisation.

Recommandations

Le processus de décision est une procédure complexe où plusieurs facteurs sont évalués. Un MAD est donc nécessaire pour faciliter une prise de décision rationnelle et lui fournir une base. Si toutefois un décideur renonçait à utiliser le MAD, les recommandations suivantes donnent des indications sur ce qui doit être pris en compte.

La recommandation la plus importante est que le décideur devrait comparer le risque de transporter une substance donnée dans un tunnel avec celui de transporter cette même substance sur l'itinéraire de substitution lorsqu'il décide de restreindre la circulation dans un tunnel. A défaut de faire cette comparaison, la décision relative au groupe pour un tunnel donné ne sera pas optimale du point de vue collectif puisque le trafic interdit dans un tunnel circulera sur un itinéraire de substitution.

Les critères à prendre en compte ne diffèrent pas de ceux sur lequel se fonde l'outil MAD informatisé. Ils sont représentés par les résultats du modèle EQR relatifs aux éléments suivants :

- Les courbes F/N pour les tués et les blessés parmi les usagers de la route et les tiers, c'est-à-dire la population locale.
- Les nombres moyens attendus de tués et blessés parmi les usagers de la route et les tiers, c'est-à-dire la population locale.
- Les dommages matériels dus à d'éventuels accidents.
- L'impact sur l'environnement dû à un accident sur l'itinéraire avec tunnel ou de substitution (les sorties du modèle EQR en matière d'environnement sont limitées, voir chapitre 5).

Les évaluations du décideur pour ce qui concerne :

- Les dépenses directes (recouvre l'investissement et le coût d'exploitation liés aux mesures de réduction du risque dans le tunnel ainsi que d'éventuels coûts supplémentaires pour le transport de marchandises dangereuses).
- Les inconvénients pour les usagers de la route découlant d'un éventuel accident (temps perdu lors des travaux de réparation consécutifs à un accident dans le tunnel).
- Les nuisances pour la population locale (impact sur l'environnement du trafic de marchandises dangereuses, à l'exclusion des conséquences d'un accident éventuel, mais en incluant éventuellement l'impact psychologique).

Tout autre critère jugé pertinent par le décideur peut également être pris en compte dans le problème de décision. Pour prendre sa décision, le décideur doit déterminer quels sont les critères pertinents et leur pondération relative. Ces choix doivent refléter les préférences du décideur.

Si l'aversion au risque est un sujet qui préoccupe le décideur, le nombre moyen attendu de décès n'entre pas seul en ligne de compte dans la décision. Les courbes F/N donnent des informations sur l'importance des accidents, c'est-à-dire la connaissance de la fréquence des accidents avec N décès ou plus. A titre d'exemple un décideur présentant une aversion au risque va considérer qu'un seul accident avec 100 tués est moins acceptable que 100 accidents avec un seul tué. L'information nécessaire pour prendre en compte l'aversion au risque réside dans la forme des courbes F/N : plus la pente est forte et mieux c'est.

Enfin, il est important de s'assurer qu'on ne franchit pas le seuil de risque acceptable pour un individu. Le modèle EQR fournit les niveaux de risque individuels pour la population locale, qui devraient être confrontés à des critères d'acceptation.

Chapitre 7

LES MESURES DE REDUCTION DU RISQUE

Objectifs et contenu

Lorsqu'on autorise des véhicules transportant des marchandises dangereuses dans un tunnel, un certain nombre de mesures peuvent être prises pour réduire la probabilité et les conséquences d'un accident. Au démarrage de ce projet, il est apparu que :

- Aucune description systématique des mesures n'était commodément disponible.
- De nombreuses mesures sont coûteuses, soit à la réalisation soit à l'exploitation ou les deux, alors qu'on ne sait souvent pas grand chose de leur efficacité.
- Il est très difficile de décider si, et dans quel cas, chaque mesure doit être mise en œuvre.

Pour ces raisons, une part significative du projet a été consacrée à l'examen des mesures de réduction du risque avec les objectifs suivants :

- *Phase I.* Examiner toutes les mesures possibles de réduction du risque, en faire une description détaillée et analyser leurs avantages et inconvénients.
- *Phase II.* Analyser objectivement l'efficacité des mesures et poser ainsi les bases d'une évaluation de leur rentabilité en tirant parti du modèle EQR décrit au chapitre 5.

Aucune analyse systématique de la rentabilité n'a jamais été signalée pour des mesures de réduction du risque du transport de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers. La principale raison en est que les effets des mesures sur les risques sont très difficiles à apprécier. Le développement d'une méthodologie permettant une telle évaluation a posé un problème majeur dans le cadre du projet. Il n'est pas intéressant de développer des outils pour estimer le coût des mesures puisque des bureaux d'études spécialisés dans la construction ou la rénovation des tunnels sont capables de réaliser des estimations de coût raisonnablement précises. On a toutefois procédé à un recueil de données sur les coûts des mesures (Van der Sluis *et al.*, 1998).

Un rapport d'ensemble (AIPCR, à paraître) donne une synthèse de tous les travaux menés sur les mesures de réduction du risque. Les principaux résultats sont présentés ci-dessous.

Phase I : Examen des mesures de réduction du risque

Cette étude (Van der Sluis *et al.*, 1998) recouvre une étude bibliographique, l'envoi d'un questionnaire à plusieurs exploitants de tunnel et une tentative de hiérarchisation des mesures. On dispose, en outre, d'informations complémentaires sur un certain nombre de mesures liées au contrôle

des incendies et des fumées (AIPCR, 1999). Les grandes lignes des résultats de ces deux études sont présentées ci-dessous.

Phase II : Évaluation de l'efficacité des mesures à l'égard du risque

Au moment de la finalisation de la phase I, une première version du modèle EQR était disponible. L'intention était de l'utiliser pour réaliser une évaluation objective de l'efficacité des mesures : comparer les effets sur les décès et les dommages en faisant tourner deux fois le modèle pour un tunnel donné, en présence et en l'absence de la mesure.

On manque cependant, pour un certain nombre de mesures, de données quantitatives concernant la probabilité et les conséquences de tous les scénarios d'accidents. Ainsi n'a-t-on pas pris en compte toutes les mesures examinées au cours de la phase I dans le modèle EQR.

Pour les mesures complètement prises en compte dans le modèle EQR (dénommées mesures *originelles*), on a pu mener avec succès l'évaluation de l'efficacité sur six tunnels retenus comme exemples, en utilisant la méthode décrite ci-dessus. Une synthèse des résultats est présentée ci-après dans ce chapitre.

Pour évaluer l'efficacité des mesures qui ne sont pas prises en compte dans le modèle EQR (mesures dites *non originelles*), un jugement d'expert s'impose. Une approche utile consiste à solliciter des avis d'expert sur l'efficacité de chaque mesure (ou ensemble de mesures) pour améliorer la sécurité en matière de transport de marchandises dangereuses pour un tunnel spécifique. Cette approche ne donne toutefois pas de résultats quantitatifs à utiliser dans une analyse détaillée coûts-bénéfices. C'est pourquoi la plupart des activités relatives aux mesures « non originelles » ont été consacrées au développement de méthodologies destinées à la prise en compte, dans toute la mesure du possible, de leurs effets lors de l'utilisation du modèle EQR. Deux méthodes complémentaires ont été explorées :

- Pour les mesures ayant une influence sur la probabilité de survenue d'un accident ou d'un scénario en cas d'accident, on a défini une méthodologie d'ajustement des probabilités utilisées dans le modèle EQR.
- Un certain nombre de mesures ont un effet sur les temps de réponse des usagers, de l'exploitant ou des équipes de secours en cas d'accident. Une méthodologie a été développée pour les prendre en compte de manière probabiliste lors de l'utilisation du modèle EQR et elle a été ensuite appliquée à quelques exemples pour donner un aperçu de l'efficacité de certaines de ces mesures.

Les conclusions expliquent comment utiliser les résultats pour apprécier la rentabilité de mesures spécifiques dans un tunnel donné.

Identification des mesures de réduction du risque

On ne prend pas ici en compte les mesures qui restreignent le transport de marchandises dangereuses (comme l'interdiction, la limitation des quantités transportées ou la restriction des périodes de circulation). Ces mesures imposent la prise en compte des itinéraires de substitution et de l'itinéraire avec tunnel. Les décisions relatives à ces mesures nécessitent l'utilisation des modèles

d'Évaluation Quantitative du Risque et d'aide à la décision comme il est décrit dans les chapitres 5 et 6.

Le tableau 7.1 reprend les 27 mesures qui ont été examinées. Étant donné que de nombreuses mesures ont plusieurs finalités, la classification est quelque peu arbitraire et est fondée sur leur finalité principale. Il prend en compte le fait que la plupart des décès se produisent en général avant l'arrivée des services de secours. Certaines mesures apparaissent une seconde fois en italique, pour indiquer une seconde finalité ayant de l'importance. Les mesures pour assurer la communication et/ou l'information visent surtout à réduire les conséquences d'un accident mais peuvent également avoir un effet sur sa probabilité en informant les usagers lorsqu'un premier incident s'est produit. Un court résumé de chacune de ces mesures est présenté ci-après.

Tableau 7.1. Liste des mesures de réduction du risque classées selon leur finalité principale

MESURES POUR REDUIRE LA PROBABILITE D'UN ACCIDENT		
Liées à la conception et à l'entretien du tunnel		
Profil en travers et perception visuelle du tunnel	Tracé	Entretien
	Éclairage (normal)	Revêtement de la route (frottement)
Liées à la circulation et aux véhicules		
Limitation de vitesse	Escorte	Contrôles des véhicules
Interdiction de dépasser	Distance entre véhicules	
MESURES POUR REDUIRE LES CONSEQUENCES D'UN ACCIDENT		
Alerte, information, communication de l'exploitant et des services de secours		
Télévision en circuit fermé	Détection automatique d'incendie	Identification automatique des véhicules
Détection automatique d'incident	Communication radio (services)	<i>Téléphone de secours</i>
Communication avec les usagers		
Téléphones de secours <i>Communication Radio (usagers)</i>	Panneaux/signaux d'alerte	Haut-parleurs
Évacuation ou protection des usagers		
Issues de secours	<i>Éclairage (de secours)</i>	Gestion des défaillances
Contrôle des fumées	Équipements résistant à l'incendie	
Réduction de l'importance de l'accident		
Équipements de lutte contre l'incendie	Drainage	Plan d'action d'urgence
Équipes de secours	<i>Revêtement de la route (non-poreux)</i>	<i>Escorte</i>
Réduction des conséquences pour le tunnel		
Structure résistante à l'incendie	Structure résistante à l'explosion	

Mesures pour réduire la probabilité d'un accident

Profil en travers et perception visuelle des tunnels

De nombreux éléments du profil en travers du tunnel exercent une influence importante sur la sécurité. Le nombre de tubes et le nombre de voies par tube ont un effet net sur la fréquence et les conséquences des accidents. La largeur des voies peut avoir un effet sur les taux d'accidents. Le dévers affecte l'efficacité du drainage et donc les conséquences d'une fuite de liquide dangereux. Des bandes dérasées peuvent avoir un effet sur les fréquences d'accidents mais elles peuvent s'avérer particulièrement utiles pour favoriser l'accès des équipes de secours et ainsi atténuer les conséquences. Les glissières de sécurité entre la chaussée et la voie pour piétons peuvent avoir un effet positif sur la gravité des accidents mais elles ont un effet très négatif sur les possibilités de s'échapper et les opérations de secours. Les garages permettant le stationnement d'urgence en cas de panne d'un véhicule réduisent la probabilité de collision. La perception visuelle du conducteur détermine dans une large mesure le confort et la vitesse de conduite qui à leur tour interagissent sur la sécurité. Le tracé et l'éclairage (voir ci-dessous) constituent des éléments essentiels ; l'image n'est toutefois pas complète sans une conception qui tient compte des formes et des couleurs du profil en travers du tunnel.

Tracé

Les pentes en montée (rampes) peuvent exercer un effet défavorable sur les taux d'accidents à cause des véhicules très lents. Les pentes en descente augmentent les risques d'accidents. Les courbes horizontales peuvent avoir un effet défavorable sur les taux d'accidents, en général en combinaison avec d'autres facteurs comme la vitesse ou une descente. Il est clair que la conception du profil en long et du tracé est un facteur important pour limiter la fréquence des accidents.

Éclairage (normal et de secours)

Les taux d'accidents sont plus élevés dans les zones d'entrée des tunnels, en raison des problèmes de visibilité, en particulier lorsqu'on passe d'un environnement extérieur très lumineux à celui beaucoup plus sombre du tunnel. C'est pourquoi, pour limiter la fréquence des accidents, un éclairage suffisant est indispensable de jour dans la zone d'entrée ; il devrait ensuite être réduit progressivement à l'intérieur du tunnel. Les recommandations nationales ou internationales assurent un éclairage adéquat ; des niveaux plus élevés n'améliorent pas la sécurité. Des balises lumineuses peuvent être installées à une hauteur d'un mètre au-dessus des trottoirs. Ceci facilite l'évacuation lorsque la fumée cache l'éclairage normal.

Entretien

Un mauvais entretien, se manifestant par exemple sous la forme de défauts de la chaussée, de défaillances de l'équipement et de l'éclairage ou d'un nettoyage insuffisant du tunnel, se traduit par une moindre sécurité pour le conducteur. Il est donc essentiel, pour réduire la probabilité d'un accident, d'assurer un entretien fiable.

Surface du revêtement

Dans un tunnel, la chaussée doit présenter les mêmes qualités d'adhérence et d'uni qu'à l'air libre. Il convient toutefois d'éviter les revêtements poreux lorsque des marchandises dangereuses sont autorisées : ils sont en effet susceptibles d'aggraver les conséquences d'un déversement de liquide et d'un incendie qui s'ensuivrait.

Limite de vitesse

Une limite de vitesse plus faible imposée à l'entrée ou à l'intérieur d'un tunnel peut présenter des inconvénients comme celui de générer de la congestion sur des routes avec un trafic lourd. Si la limite ne concerne qu'une partie du trafic, par exemple les véhicules qui transportent des marchandises dangereuses ou tous les véhicules lourds, elle tend à accroître l'écart de vitesses entre véhicules, ce qui est susceptible de générer des risques de collision supplémentaires. Le respect de la limite de vitesse soulève d'autres difficultés. Toutefois, globalement la réduction des vitesses diminue la fréquence et la gravité des accidents. Elle est considérée comme l'une des mesures offrant la meilleure rentabilité à condition que les difficultés mentionnées ci-dessus puissent être surmontées.

Interdiction de dépasser

Le dépassement est en général interdit dans les tunnels à double sens comportant une seule voie dans chaque direction. Dans les tubes à sens unique, le dépassement est en général autorisé pour les voitures particulières ; il est recommandé de l'interdire à tous les véhicules lourds. Il n'y a aucune raison d'appliquer cette mesure uniquement aux véhicules transportant des marchandises dangereuses.

Escorte

Une escorte consiste à arrêter les véhicules qui transportent des marchandises dangereuses avant qu'ils ne pénètrent dans le tunnel, à effectuer une inspection visuelle, puis à leur faire traverser le tunnel par petits groupes (en maintenant des distances suffisantes entre les véhicules), accompagnés de véhicules transportant du matériel de lutte contre l'incendie et autres équipements de sécurité. Les véhicules d'escorte peuvent être placés derrière les véhicules de marchandises dangereuses, ou devant et derrière. D'autres véhicules peuvent ou non être autorisés dans le tunnel pendant l'escorte. Cette mesure est coûteuse mais susceptible de réduire la fréquence des accidents et d'en atténuer les conséquences puisqu'un éventuel incendie sera détecté et combattu très rapidement et que moins de personnes se trouveront à proximité du véhicule qui brûle. Une mesure moins coûteuse (et moins efficace) consiste à arrêter les véhicules de marchandises dangereuses et de les prévenir quand ils peuvent s'engager de façon à ce que l'exploitant puisse au préalable prendre toutes les précautions qui s'imposent (par exemple éviter la présence simultanée d'autocars).

Distance entre véhicules

Une distance suffisante entre véhicules en mouvement réduit la fréquence des collisions arrières. Un inconvénient est qu'elle réduit en même temps la capacité de circulation dans le tunnel et qu'elle induit de la congestion si le trafic est intense. Une distance suffisante entre véhicules arrêtés à l'intérieur d'un tunnel à cause d'un accident peut en atténuer les conséquences parce que moins de personnes se trouvent à proximité de celui-ci et qu'un éventuel incendie ne pourra pas s'étendre aussi

facilement. Il reste toutefois très difficile de faire respecter les distances entre véhicules, qu'ils soient en mouvement ou à l'arrêt.

Contrôles des véhicules

Une autre mesure, moins coûteuse que l'escorte, consiste à arrêter les véhicules qui transportent des marchandises dangereuses (ou tous les poids lourds) avant qu'ils ne s'engagent dans le tunnel et à effectuer une inspection visuelle avant de les autoriser à poursuivre. Des fuites ou des surchauffes de certains éléments peuvent être ainsi détectés. On teste actuellement un équipement permettant de détecter automatiquement les éléments en surchauffe sur les véhicules.

Mesures destinées à atténuer les conséquences d'un accident

Télévision en circuit fermé

Les grands tunnels sont équipés d'un système de télévision en circuit fermé qui couvre le tunnel sur toute sa longueur ainsi que les zones autour des entrées. L'objectif est double :

- Surveiller le flux de circulation et éventuellement les véhicules transportant des marchandises dangereuses s'ils doivent recevoir une autorisation ou s'ils sont escortés.
- Détecter, ou au moins identifier, tout incident ou accident et obtenir les informations nécessaires pour déclencher les actions appropriées.

En général, l'exploitant ne surveille pas en permanence l'ensemble du tunnel mais toute alarme (détection automatique d'incident, manipulation d'un combiné téléphonique ou d'un extincteur, etc.) va attirer l'attention de l'exploitant sur un écran qui est automatiquement orienté sur la partie du tunnel d'où provient l'alarme.

Détection automatique d'incident de la circulation

Un système de détection automatique d'incident de la circulation est capable de détecter une modification dans les conditions de circulation telle qu'un arrêt ou une réduction significative de la vitesse. Utilisé en combinaison avec la télévision, il permet à l'exploitant de recevoir rapidement des informations sur la cause des changements dans les conditions de circulation. Celui-ci peut ainsi engager une action efficace pour réduire l'éventualité d'un accident à la fin d'un bouchon (réduisant la fréquence des accidents) ou en cas d'accident, pour faciliter l'évacuation des usagers de la route et alerter les équipes de secours (limitant les conséquences de l'accident). Un tel système vient utilement compléter la télévision (puisque l'exploitant ne surveille pas en permanence l'ensemble du tunnel) ainsi que d'autres systèmes d'alarme comme les téléphones de secours.

Détection automatique d'incendie

La détection automatique d'incendie facilite, lorsque celui-ci se produit, la rapidité de l'action. Des capteurs de monoxyde de carbone et d'opacité sont mis en œuvre dans les tunnels ventilés : ils détectent les produits de l'incendie mais n'ont pas la capacité de les différencier des polluants normalement émis par les véhicules. Un système spécifique de détection d'incendie est spécialement utile dans les tunnels sans surveillance humaine lorsque le régime de ventilation en cas d'incendie est

différent de celui qui se déclenche automatiquement en cas de pollution (par exemple extraction de fumée au lieu de soufflage d'air frais). Dans les tunnels avec surveillance humaine, la détection automatique d'incendie peut réduire le temps de détection et localiser l'incendie. On peut toutefois obtenir une détection indirecte d'incendie en couplant un système de détection d'incident avec une télévision.

Communication radio (services et usagers)

Les signaux radio ne sont pas reçus en souterrain. De plus en plus de tunnels sont maintenant équipés de systèmes de retransmission qui peuvent cibler tout ou partie des usagers ci-après :

- Les services d'urgence pour qu'ils puissent communiquer avec leurs centres de contrôle et le centre de contrôle du tunnel.
- Les automobilistes, de telle sorte qu'une ou plusieurs stations publiques de radio peuvent être rediffusées ; en cas d'urgence, l'exploitant du tunnel peut s'insérer sur ces fréquences et donner des informations et des instructions de sécurité ; les téléphones mobiles peuvent également être retransmis et servir à alerter les usagers ou à permettre aux personnes en difficulté de demander de l'aide en cas de besoin.
- Le personnel du tunnel, pour améliorer la sécurité et l'efficacité des équipes d'entretien et de secours.

Identification automatique des véhicules

Un système d'identification automatique des véhicules pourrait fournir à l'exploitant des informations sur les véhicules transportant des marchandises dangereuses qui pénètrent dans le tunnel. En cas d'accident, les actions appropriées pourraient être initiées puisqu'on connaîtrait ainsi les propriétés des marchandises impliquées. Le système faciliterait également le contrôle du respect des interdictions à condition que la détection soit complètement automatisée et intervienne suffisamment en amont du tunnel. Un tel système est techniquement faisable mais il requiert une normalisation de l'équipement embarqué ainsi qu'une réglementation internationale applicable.

Téléphones de secours

La plupart des tunnels sont équipés de téléphones de secours disposés à intervalles réguliers. Cet équipement est important pour la sécurité :

- Il peut être utilisé par les automobilistes pour informer l'exploitant du tunnel ou la police de la situation à l'intérieur du tunnel et donner ainsi l'alerte en cas d'accident.
- Les usagers peuvent être informés de la marche à suivre dans une situation donnée.
- Il peut également être utilisé par les services d'urgence à l'intérieur du tunnel si aucun autre moyen de communication n'est disponible.

Panneaux/signaux d'alerte

Des panneaux fixes sont utilisés pour indiquer les dispositifs de sécurité qui peuvent être utilisés par les automobilistes, tels que les extincteurs, les téléphones et les issues de secours. En outre, des feux de circulation sont utilisés dans la plupart des tunnels pour empêcher les véhicules de pénétrer dans le tunnel en cas d'accident ; ces feux sont également utilisés à l'intérieur des tunnels de grande longueur pour arrêter les véhicules en cas d'accident au lieu de les laisser s'accumuler sur le lieu de l'accident. Le principal problème réside dans le respect de ces feux par les conducteurs. Aussi, dans les tunnels avec surveillance humaine, est-il recommandé d'installer également des panneaux à message variable pour fournir des explications aux conducteurs. Plusieurs pays installent également des barrières aux têtes des tunnels.

Haut-parleurs

Plusieurs pays installent des haut-parleurs dans les tunnels routiers. Ils peuvent servir à donner des instructions à un automobiliste isolé qui a quitté son véhicule ou à tous les usagers présents dans le tunnel en cas d'urgence. Toutefois, l'utilisation de haut-parleurs se heurte à un certain nombre de problèmes en raison de la mauvaise qualité acoustique de la plupart des tunnels, du bruit ambiant créé par la circulation et la ventilation et du nombre de langues qu'il faudrait employer pour que la majorité des usagers comprennent le message.

Issues de secours

Les possibilités d'évacuation suivantes existent :

- Quitter le tube du tunnel à pied (ou en voiture dans les tunnels bidirectionnels à faible trafic).
- Des communications directes avec l'extérieur (dans les tunnels à faible profondeur).
- Des communications entre tubes du tunnel (dans les tunnels avec deux tubes ou plus).
- Des couloirs (dans les structures en tranchée ou immergées) ou des galeries (dans les tunnels profonds) réservés aux secours.
- Des abris (dans les tunnels mono-tubes profonds, ce sont des pièces sûres ignifugées, ventilées et équipées d'un téléphone, souvent reliées à l'air libre, par une gaine de ventilation d'air frais par exemple).

Les issues de secours sont très utiles pour limiter l'exposition des usagers à un environnement dangereux en cas d'accident impliquant des marchandises dangereuses.

Contrôle des fumées

Le contrôle des fumées (désenfumage) est souvent obtenu en utilisant l'équipement de ventilation du tunnel. En raison d'une diminution significative des émissions polluantes des véhicules, le choix et la conception du système de ventilation sont de plus en plus déterminés par les besoins à satisfaire en cas d'incendie. La ventilation longitudinale vise à créer un flux d'air uniforme le long du tunnel, le plus souvent en utilisant des accélérateurs. En cas d'incendie, la fumée est poussée vers l'une des têtes du tunnel : ainsi ce système est-il bien adapté aux tubes en sens unique sans congestion. Dans d'autres

cas, on peut utiliser la ventilation semi-transversale ou transversale. Dans des conditions normales d'exploitation, des conduits d'air apportent l'air frais à l'intérieur du tunnel tandis que d'autres conduits peuvent être utilisés pour rejeter l'air pollué. En cas d'incendie, l'équipement est exploité de façon à limiter le flux d'air longitudinal, de façon à faciliter la stratification de la fumée dans la partie supérieure et laisser une couche d'air pur en dessous. Dans le même temps la fumée est extraite par des ouvertures pratiquées dans la voûte. Cette extraction est en général dimensionnée pour un incendie de camion et non pas pour un incendie très grave de matières dangereuses.

Équipements résistant au feu

Tous les équipements n'ont pas à résister à l'incendie : par exemple l'éclairage ou les caméras vidéo situés en partie haute seront de toute façon obscurcis par la fumée dans les zones à température élevée. Il est toutefois nécessaire que l'appareillage continue à fonctionner de chaque côté d'un incendie. Ceci signifie que les réseaux d'alimentation en énergie et de télécommunications doivent être protégés. L'équipement de ventilation doit également satisfaire à des contraintes de résistance au feu pour assurer un contrôle adapté des fumées à température élevée.

Gestion des défaillances

Au cours d'un accident, certains composants structuraux et certains équipements peuvent se rompre ou tomber en panne en raison des températures élevées ou pour d'autres raisons. En conséquence, les différents systèmes doivent être conçus de sorte qu'une défaillance n'ait qu'un effet limité. On peut faire appel aux méthodes suivantes de gestion des défaillances :

- *La redondance* : par exemple, lorsque l'alimentation électrique normale s'interrompt, une alimentation de secours prend le relais.
- *Le dispositif de sécurité positive* : par exemple, l'interruption de l'alimentation électrique ne laisse pas les portes d'issues de secours condamnées.
- *Le fractionnement* : ceci est utilisé par exemple, pour les conduites d'alimentation qui fuient ou l'éclairage d'urgence, de sorte que si une section est hors d'usage, les autres vont continuer à fonctionner.

Équipement de lutte contre l'incendie

Tous les tunnels mettent à la disposition des automobilistes un équipement de lutte contre l'incendie : des extincteurs sont placés à intervalles réguliers et dans certains pays on dispose également de tuyaux d'incendie. Ces équipements ont prouvé leur efficacité dans de nombreux cas pour éteindre des incendies à leur début. Tous les tunnels importants comportent des bouches d'incendie, certains fournissent également des tuyaux à utiliser par les pompiers. Des réservoirs d'eau spécifiques ou le réseau local d'adduction d'eau en assurent généralement l'alimentation. Les systèmes automatiques d'extinction (*sprinklers*) ne sont pas recommandés comme équipement de sécurité dans les tunnels, en raison des dangers qu'ils peuvent créer pour les personnes présentes dans la zone d'incendie et la zone enfumée. Cependant ils peuvent être utilisés pour protéger le tunnel une fois l'évacuation achevée.

Équipes de secours

En cas d'urgence dans un tunnel, on appelle les services publics de secours. Leur accès au tunnel peut être gêné par l'importance des distances ou la congestion de la circulation (qui peut découler de l'accident lui-même). Une fois arrivés au tunnel, l'accès au site même de l'accident dépend des circonstances (en empruntant le tube où a eu lieu l'accident, un second tube, des accès directs depuis l'extérieur, etc.). Même si leur action est très importante pour maîtriser l'incendie ou évacuer les blessés, dans la plupart des cas l'incendie aura déjà atteint sa pleine intensité et les décès seront déjà survenus avant qu'ils n'aient pu arriver sur place. Pour cette raison, dans les tunnels présentant un risque élevé (tunnels mono-tubes de grande longueur avec un trafic lourd ou tunnels plus courts très fréquentés), on peut poster des équipes de secours aux têtes du tunnel pour qu'elles puissent intervenir dans un délai de quelques minutes.

Drainage

En général, on construit un système de drainage dans les tunnels pour évacuer l'eau polluée de la surface de la chaussée et (souvent séparément) l'eau propre venant du sol. Ce système est également très utile pour évacuer un liquide dangereux qui se serait répandu accidentellement. Pour en renforcer l'efficacité en cas de fuite soudaine et importante, on peut diminuer la distance entre les ouvertures ou réaliser un caniveau fente. On peut construire des siphons pour éviter la propagation des flammes et les explosions dans le système souterrain en cas de déversement d'un liquide inflammable.

Plan d'urgence ou d'action

Un plan d'urgence ou d'action est indispensable pour lancer rapidement toutes les actions nécessaires et assurer la coordination entre les nombreuses parties qui interviennent en cas d'accident grave. Il doit décrire les actions que doit réaliser l'exploitant ainsi que les services d'urgence et la communication entre ceux-ci. Sa préparation doit impliquer toutes les parties prenantes et se fonder sur un certain nombre de scénarios d'accident. Le plan d'urgence doit être régulièrement actualisé pour tenir compte de tous les changements dans le tunnel, le trafic et l'environnement. La formation, y compris des exercices à intervalles réguliers, est nécessaire afin que le plan soit efficace lorsqu'une urgence survient.

Structure résistante au feu

En l'absence de disposition spécifique, les structures de tunnel peuvent s'effondrer, au moins localement, en cas d'incendie grave. Ceci risque de mettre en danger la sécurité des usagers et des services de secours et d'imposer des réparations coûteuses et une longue interruption de la circulation. La nécessité d'assurer la résistance au feu dépend du type de tunnel et du rôle de la structure spécifique. La structure principale d'un tunnel dans le rocher ne nécessite pas en général de résistance au feu particulière ; à l'opposé, les tunnels immergés ont besoin d'une protection suffisante pour prévenir l'invasion du tunnel par les eaux en raison d'une rupture locale pendant un incendie. Lorsqu'ils sont prévus, les abris doivent résister au feu. En fonction de leur rôle, un certain degré de résistance au feu peut être exigé des conduits de ventilation pour maintenir un contrôle efficace des fumées.

Structure résistante à l'explosion

La résistance à l'explosion d'une structure ne s'impose pas pour des raisons de sécurité car une explosion susceptible d'endommager le tunnel ne laissera aucun survivant. Toutefois, lorsque le groupe A (voir chapitre 4) est autorisé, il faut vérifier la stabilité d'un éventuel second tube en cas d'explosion dans le premier. A part ce point particulier, la résistance à l'explosion ne vise qu'à protéger le tunnel lui-même. Son coût élevé ne permet en général pas qu'il soit justifié en termes de rapport coût-efficacité si on recherche une protection contre des explosions très violentes.

Hierarchisation des mesures

Il a été demandé à un certain nombre d'exploitants représentant quatorze tunnels européens de répondre à un questionnaire divisé en trois parties (Van der Sluis *et al.*, 1998). La première partie du questionnaire portait sur des informations générales relatives au tunnel, la seconde sur des informations relatives aux mesures ayant fait l'objet d'enquêtes et la troisième concernait la hiérarchisation des mesures. Parmi les informations demandées figuraient le coût de la mesure, son effet sur la réduction du nombre de victimes et la réduction potentielle des dommages au tunnel.

A partir de ces informations, on a affecté l'une des trois notes suivantes à l'effet de chaque mesure :

1 = effet faible.

2 = effet moyen.

3 = effet important.

Les mesures ont ensuite été réparties entre trois groupes d'effets : 25 % des mesures avec la note la plus élevée forment le groupe des mesures d'effet important. Les 50 % suivants sont définis comme le groupe d'effet moyen. Les mesures restantes sont réunies au sein du groupe de faible effet.

L'information relative aux coûts était délicate puisque les réponses au questionnaire étaient incomplètes. Pour résoudre ce problème, chaque mesure a été classée comme un coût faible, moyen ou élevé.

Les trois catégories à la fois pour ce qui concerne l'effet sur la réduction du nombre de victimes et le coût des mesures se visualisent bien dans une matrice 3x3 qui montre la rentabilité de chaque mesure (voir tableau 7.2). Dans cette matrice, on peut distinguer trois parties. La cellule (faible coût) x (effet important) indique les mesures qui sont très rentables. La cellule (coût élevé) x (effet faible) indique les mesures qui sont peu rentables. Les sept cellules restantes contiennent les mesures dont les niveaux de rentabilité sont moins prononcés. Ces sept cellules forment la « zone grise ».

Tableau 7.2. **Hierarchisation des mesures en fonction de leur rentabilité pour la réduction du nombre de victimes ou des dommages**

	Effet important	Effet moyen	Effet faible
Coût faible	TRES RENTABLE		
Coût moyen			
Coût élevé			PEU RENTABLE

La même matrice 3x3 peut être utilisée pour visualiser la rentabilité des mesures en termes de réduction des dommages sur la structure du tunnel.

L'étude a montré que l'on obtient des notes différentes pour les mesures selon que l'on s'intéresse à leur effet sur la réduction du nombre de victimes ou des dommages sur la structure du tunnel.

Conclusions

Les principales conclusions de l'étude sont énumérées ci-dessous :

- La méthode présentée pour hiérarchiser les mesures doit être appliquée à un tunnel donné, chaque tunnel étant unique.
- La méthode est qualitative et peut être utilisée pour sélectionner les mesures les plus prometteuses pour un tunnel donné en vue de réduire le risque du transport de marchandises dangereuses.
- Lorsque les mesures sont classées, il faut distinguer les effets sur la réduction du nombre de victimes et sur la réduction des dommages sur la structure du tunnel car ces classements peuvent être très différents.
- La hiérarchisation adoptée dans cette étude fait ressortir trois groupes :
 1. Les mesures de faible coût et d'effet important et donc très rentables et recommandées.
 2. Les mesures de coût élevé et de faible effet et donc peu rentables et non recommandées.
 3. Les mesures dans la zone grise.

Il est recommandé de toujours examiner une mesure de faible coût même si son effet est moyen ou faible.

L'efficacité des mesures originelles de réduction du risque

Introduction

Les mesures *originelles* sont celles déjà prises en compte dans le modèle EQR décrit dans le chapitre 5. Un certain nombre de tests de sensibilité ont été réalisés pour examiner comment les résultats du modèle EQR sont affectés par des changements dans les mesures de réduction du risque (Pons, 2000). Les mesures « originelles » recouvrent la résistance au feu, la résistance à l'explosion, le contrôle des fumées, le drainage, les sorties de secours, le délai pour fermer le tunnel et le délai pour activer la ventilation. Le profil en travers (nombre de voies, dévers) et la pente ont également été examinés. Si un total de neuf paramètres ont été examinés dans cette étude, le profil en travers, la pente et la résistance au feu et à l'explosion sont spécifiques au tunnel et on ne les a donc pas fait varier dans le cadre de cette étude. On a utilisé une version antérieure du modèle EQR ne prenant en compte que les dix premiers scénarios détaillés dans le tableau 5.1.

Methodologie

Une étude de sensibilité a été conduite en vue d'examiner comment les résultats du modèle EQR sont affectés par des modifications dans les mesures « originelles » de réduction du risque. L'étude a été menée pour les tunnels suivants :

- Tunnel V (2 kilomètres, 2 tubes, ventilation longitudinale).
- Tunnel H (3 kilomètres, 1 tube, ventilation longitudinale).
- Tunnel W (6.7 kilomètres, 2 tubes, ventilation longitudinale).
- Tunnel S (8.6 kilomètres, 1 tube, ventilation semi-transversale).
- Tunnel C (1 kilomètre, 2 tubes, ventilation longitudinale).
- Tunnel O (3.3 kilomètres, 1 tube, 3 voies, ventilation semi-transversale).

Les tunnels pris en compte dans l'étude ne l'ont été qu'à titre d'exemple et il est possible que les données ne correspondent pas aux mesures/dispositifs/caractéristiques réelles de ces tunnels. Les caractéristiques fondamentales des tunnels ont été indiquées par les autorités concernées, sans vérification de la précision de ces données. C'est pourquoi les tunnels ne sont pas nommés.

L'étude de sensibilité a été menée sur la même base pour tous les tunnels. On a défini un cas de référence correspondant, dans la mesure du possible, à la définition réelle du tunnel étudié. On a fait varier les paramètres « originels » de réduction du risque de la manière suivante :

- *Sorties de secours* : aucune, tous les 100 mètres, 250 mètres et 500 mètres.
- *Drainage* : aucun, 0.1m^2 à intervalles de 100 mètres, 0.3m^2 à intervalles de 20 mètres, fente continue de 5 cm de large et fente continue de 9 cm de large.
- *Contrôle des fumées* : Pour le système longitudinal : ventilation normale = 0.6 m/s ou correspondant au cas de référence ; ventilation d'urgence = 0, 2, 3, 4 et 5 m/s. Pour les systèmes transversaux le débit d'extraction et le courant d'air longitudinal sont modifiés.
- Temps nécessaire pour que la ventilation d'urgence soit complètement opérationnelle : 5, 10, 12 et 15 minutes.
- Délai nécessaire pour interrompre l'accès au tunnel : 1, 6, 8 et 11 minutes.

Le temps pris pour activer la ventilation d'urgence et le délai nécessaire pour interrompre l'accès au tunnel ne sont pas considérés indépendamment l'un de l'autre. Par exemple un délai d'une minute pour interrompre l'accès au tunnel correspond à un délai de cinq minutes pour que la ventilation de secours soit opérationnelle (les actions de lancer la ventilation et d'interrompre la circulation étant prises simultanément).

Les « paramètres de référence » pour chaque tunnel sont présentés dans le tableau 7.3. Pour les tunnels S et O on utilise un système de ventilation semi-transversale. En utilisation normale, l'air frais est soufflé à l'intérieur à un taux équivalent à 30 % de la capacité maximale, avec une capacité totale de $516\text{m}^3/\text{s}$ pour le tunnel O et de $554\text{m}^3/\text{s}$ pour le tunnel S, et sans extraction. En situation d'urgence l'extraction est portée à $110\text{m}^3/\text{s}$ dans la zone de l'accident pour les deux tunnels. Dans chacune des

deux situations (normale et urgence) il existe un gradient de pression de 6 Pa entre les deux têtes pour le tunnel O et de 50 Pa pour le tunnel S.

Les paramètres suivants ont été modifiés : issues de secours, espacement du drainage et surface d'ouverture, délai de ventilation, délai d'accès et conditions de ventilation. Chaque paramètre a été modifié à son tour tandis que les autres étaient maintenus à leur valeur de référence.

Tableau 7.3. Paramètres du cas de référence pour les six tunnels

Cas de référence	Unité	Tunnel C	Tunnel H	Tunnel O	Tunnel S	Tunnel V	Tunnel W
Longueur	m	1 075	1 855	3 681	8 602	2 020	6 700
Nombre de tubes	-	2	1	1	1	2	2
Circulation	-	1 sens	2 sens	2 sens	2 sens	1 sens	1 sens
Espacement des issues de secours	m	200	-	400	200 ⁴	100	250
Drainage (intervalle)	m	20	50	Cont ¹	Cont	100	20
Drainage (ouverture)	m	0.075	0.09	0.07	0.09	0.3	0.06
Délai pour la ventilation de secours	mn	5	1 ⁵	1 ⁵	1 ⁵	1 ⁵	3
Délai pour interdire l'accès	mn	15	5	15	15	1	1
Système de ventilation	-	Long ²	Long	Semi ³	Semi	Long	Long
Vitesse de l'air en ventilation normale	m/s	1	3.3	-	-	3.4	1
Vitesse de l'air en ventilation de secours	m/s	4.5	2.2	-	-	3	4
% de soufflage d'air	%	-	-	30	30	-	-
Extraction	m ³ /s	-	-	110	110	-	-
Différence de pression	Pa	-	-	6	50	-	-

1. Cont : Drainage continu.

2. Long : Ventilation longitudinale.

3. Semi : Ventilation semi-transversale.

4. En réalité 800 mètres.

5. En réalité il faut considérer le temps pour démarrer la ventilation + le temps nécessaire pour que la ventilation atteigne sa pleine capacité (minimum 3 minutes).

Résultats

Dans l'interprétation des résultats, il faut tenir compte des incertitudes liées au modèle lui-même et à la description du cas considéré (par exemple itinéraire, usagers de la route, population locale et conditions météorologiques). Dans le cas d'une étude de sensibilité, les incertitudes à prendre en compte ne renvoient qu'au paramètre qu'on fait varier (tous les autres paramètres restent constants). Ceci peut conduire à interpréter comme significatives de légères différences qui sinon auraient été tenues pour négligeables.

Distance moyenne entre deux issues de secours

On considère que les issues de secours sont des portes/cheminements conduisant vers une galerie sûre (second tube, conduit d'air frais) qui permet l'évacuation *a priori* en sécurité vers les têtes du

tunnel. Aussi les abris distribués à l'intérieur du tunnel (et non reliés à une galerie sûre) n'ont-ils pas été considérés comme des issues de secours.

La distance moyenne entre deux issues de secours devrait avoir un effet sur l'évacuation et donc sur le nombre de victimes dénombrées pour un accident donné. On n'attend aucun effet sur les fréquences des scénarios mais la probabilité de décès pourrait éventuellement diminuer lorsque les issues de secours sont plus proches.

L'étude de sensibilité a montré que lorsque la distance moyenne entre deux issues de secours diminue de la longueur du tunnel à 100 mètres, aussi bien le *nombre moyen de décès* que le *nombre maximum de victimes* diminuent pour les scénarios incendie de 20 MW et explosion de nuage de vapeur d'essence (VCE). On observe parfois une diminution pour les scénarios incendie de 100 MW, feu de nappe d'essence, BLEVE, explosion de nuage de vapeur (VCE) et feu chalumeau de gaz de pétrole liquéfié (GPL), et ammoniac. La diminution de la distance entre issues de secours se traduit par une diminution de la *probabilité d'avoir un nombre donné de victimes*.

Système de drainage

Si l'on considère les dix scénarios de la version de l'Évaluation Quantitative du Risque utilisée pour l'étude de sensibilité, les seuls scénarios qui peuvent être affectés par le système de drainage sont le feu de nappe d'essence et l'explosion de nuage de vapeur d'essence.

On s'attend à ce que le système de drainage ait un effet sur l'étendue de la nappe et donc sur le nombre de victimes calculé pour un accident donné. On ne s'attend à aucun effet sur les fréquences d'accidents mais la probabilité de décès est susceptible d'être affectée lorsque la surface ouverte du système de drainage est plus importante.

L'étude de sensibilité a montré que lorsque la surface ouverte du système de drainage augmente depuis l'absence de drainage jusqu'à une fente continue de 9 centimètres de large, aussi bien le *nombre moyen de décès* que le *nombre maximum de victimes* diminuent toujours pour les scénarios explosion de nuage de vapeur et parfois pour le scénario feu de nappe d'essence. Le système de drainage n'affecte aucun des autres scénarios ni n'a d'effet remarquable (globalement) sur la *probabilité d'avoir un nombre donné de victimes*.

Délai d'activation des procédures d'urgence

Les délais d'activation des procédures d'urgence devraient avoir un effet sur le nombre de personnes présentes dans la zone dangereuse lorsque le scénario est lancé (accès interdit peu de temps après) et sur les conséquences physiques des scénarios. Cet effet sur les conséquences physiques devrait se traduire par une réduction du risque lorsque les délais diminuent, si le scénario examiné est un incendie ou une fuite de produit toxique. En cas d'explosion de nuage de vapeur, la modification de la ventilation (de normale à urgence) conduit à une modification de la masse inflammable (entre les limites supérieure et inférieure d'inflammabilité). Il n'est pas possible de dire *a priori* si cette masse inflammable est plus importante ou plus faible après la modification de la ventilation. Ainsi la modification du délai d'activation de la ventilation de secours pourrait ne déboucher sur aucune tendance nette ou même déboucher sur des tendances inverses de celles observées pour d'autres scénarios.

On ne s'attend à aucun effet sur les fréquences de scénario mais la probabilité de décès pourrait se trouver éventuellement affectée lorsque les procédures d'urgence sont activées plus rapidement.

L'étude de sensibilité a montré que lorsque le temps pris pour activer les procédures d'urgence se réduit, aussi bien le *nombre moyen de décès* que le *nombre maximum de victimes* diminuent pour tous les scénarios, à l'exception de l'explosion du nuage de vapeur d'essence. Pour ce scénario, on trouve suivant les cas des augmentations ou des diminutions. Les effets les plus importants sont observés pour les scénarios GPL. Lorsque le délai diminue, ceci se traduit également par une diminution (globale) de la *probabilité d'avoir un nombre donné de victimes*.

Ventilation d'urgence

Pour ce paramètre, on a séparé la présentation et l'interprétation des résultats pour les tunnels avec un système de ventilation semi-transversale (tunnels O et S) et ceux avec une ventilation longitudinale (tunnels C, H, V et W).

On s'attend à ce que le paramètre ventilation d'urgence ait un effet sur les conséquences physiques des scénarios examinés. On ne s'attend à aucun effet sur les fréquences de scénario mais la probabilité que surviennent un ou plusieurs décès pourrait éventuellement diminuer lorsque le débit de la ventilation augmente.

Ventilation transversale

Pour ce qui concerne la ventilation d'urgence appliquée à des systèmes semi-transversaux, un ensemble de quatre calculs a été réalisé avec un apport modéré d'air frais soufflé tout au long des tunnels examinés (30 % de la capacité) et une extraction respectivement de 0, 50, 110, 200 m³/s dans le tronçon où l'accident se produit. Un cinquième calcul a été effectué avec une extraction de 110 m³/s mais sans apport d'air frais le long du tunnel (l'effet des conditions atmosphériques sur les flux longitudinaux reste constant de la situation normale à la situation d'urgence).

L'étude de sensibilité a montré que lorsque l'extraction de l'air dans le tronçon où l'accident se produit augmente, le *nombre moyen de décès* ainsi que le *nombre maximum de victimes* diminuent pour les scénarios d'incendie de 20 MW. En outre, on observe une augmentation des victimes pour le scénario ammoniacque et une légère diminution des victimes pour l'incendie de 100 MW et le feu de nappe de carburant. Il n'y a pas d'effet sur les scénarios explosion de nuage de vapeur ni BLEVE.

Ventilation longitudinale

Pour les tunnels avec une ventilation longitudinale, les études de sensibilité montrent que lorsqu'on augmente la ventilation d'urgence dans les tunnels où la ventilation initiale n'est pas suffisante pour éviter le retour de fumée (*back-layering*), le *nombre moyen de décès* ainsi que le *nombre maximum de victimes* diminuent pour tous les scénarios à l'exception du scénario BLEVE de GPL. Ces effets ne sont observés que lorsque la ventilation d'urgence passe de 0 à 3 m/s. En outre, on note que cette diminution dépend également du délai mis à activer les procédures de secours ; l'effet est plus important lorsque les délais sont plus courts.

Pour les tunnels avec une vitesse initiale de l'air suffisante pour éviter le retour de fumée (*back-layering*), l'étude de sensibilité montre qu'une augmentation de la ventilation de secours conduit à une

diminution significative du *nombre moyen de décès* ainsi que du *nombre maximum calculé de victimes* pour les scénarios incendie et ammoniacque. Cet effet est beaucoup plus faible dans le tunnel H. Ces diminutions du nombre moyen de décès sont surtout observées pour des vitesses d'urgence importantes (3 m/s et plus). L'effet du scénario BLEVE, qui est après tout un phénomène soudain, ne varie pas lorsqu'on modifie la ventilation d'urgence.

Conclusions

En conclusion de cette partie de l'étude, on résumera les principales observations/interprétations tirées des études des tunnels. En général, on a fait appel à deux grands indicateurs : le nombre moyen de décès et le nombre maximum de victimes. Il apparaît que même si, dans certains cas, le nombre moyen de décès est sujet à des variations limitées lorsqu'on modifie un des paramètres examinés, on peut observer des diminutions substantielles du nombre maximum de victimes.

En ce qui concerne les tunnels étudiés, on peut conclure que :

- La distance moyenne entre issues de secours revêt une grande importance pour les scénarios incendie de 20 MW et explosion de nuage de vapeur de carburant dans tous les tunnels mais qu'elle peut également avoir un effet important sur les scénarios incendie de 100 MW, feu de nappe de carburant, BLEVE de GPL et ammoniacque dans certains tunnels.
- Le système de drainage est d'une extrême importance pour les scénarios explosion de nuage de vapeur dans tous les tunnels et feu de nappe de carburant dans certains tunnels.
- Le délai d'activation des procédures d'urgence est important pour tous les scénarios à l'exception de celui d'explosion d'un nuage de vapeur de carburant. Les effets les plus importants sont observés pour les scénarios GPL.
- La ventilation d'urgence est d'une extrême importance pour le scénario incendie de 20 MW dans les tunnels avec un système de ventilation semi-transversale. Aucun effet n'est observé dans ces tunnels sur les scénarios explosion de nuage de vapeur et BLEVE.
- Dans les tunnels avec une ventilation longitudinale, l'effet de la ventilation d'urgence dépend de la vitesse initiale de l'air :
 - Dans les cas où la ventilation initiale n'est pas suffisante pour éviter le retour de fumée (*back-layering*), la ventilation d'urgence aura un effet sur tous les scénarios sauf le BLEVE de GPL, lorsqu'on augmente la ventilation d'urgence de 0 à 3 m/s. Ces effets sont plus prononcés dans les tunnels où les délais d'activation des procédures d'urgence sont courts.
 - Dans les cas où la ventilation initiale est suffisante pour éviter le retour de fumée, la ventilation d'urgence aura un effet considérable sur les scénarios incendie et ammoniacque dans les tunnels unidirectionnels. Les effets sur les scénarios restants dans les tunnels unidirectionnels et sur l'ensemble des scénarios dans les tunnels bidirectionnels sont moins prononcés et inexistantes pour le scénario BLEVE.

Efficacité des mesures non originelles de réduction du risque qui visent les probabilités d'accident

Introduction

Cette partie s'appuie sur l'évaluation d'un certain nombre de mesures « non originelles » de réduction du risque en termes de leur effet sur le risque (Saccomanno *et al.*, 2000). Toutefois, l'influence des changements dans les mesures de sécurité « non originelles » ne peut être qu'inférée en introduisant des ajustements externes aux estimations du modèle de base. En l'absence d'une procédure détaillée et objective d'introduction de tels changements, l'application du modèle aux mesures de sécurité « non originelles » reste de nature un peu spéculative.

Dans cette partie, l'objectif est de développer une méthode permettant d'introduire ces mesures de sécurité « non originelles » dans le modèle EQR existant de façon à pouvoir les évaluer de manière objective.

Méthodologie

La figure 7.1 illustre le cadre de l'approche retenue pour étudier les mesures de sécurité « originelles » et « non originelles » dans le modèle EQR existant. Ce cadre comporte six modules :

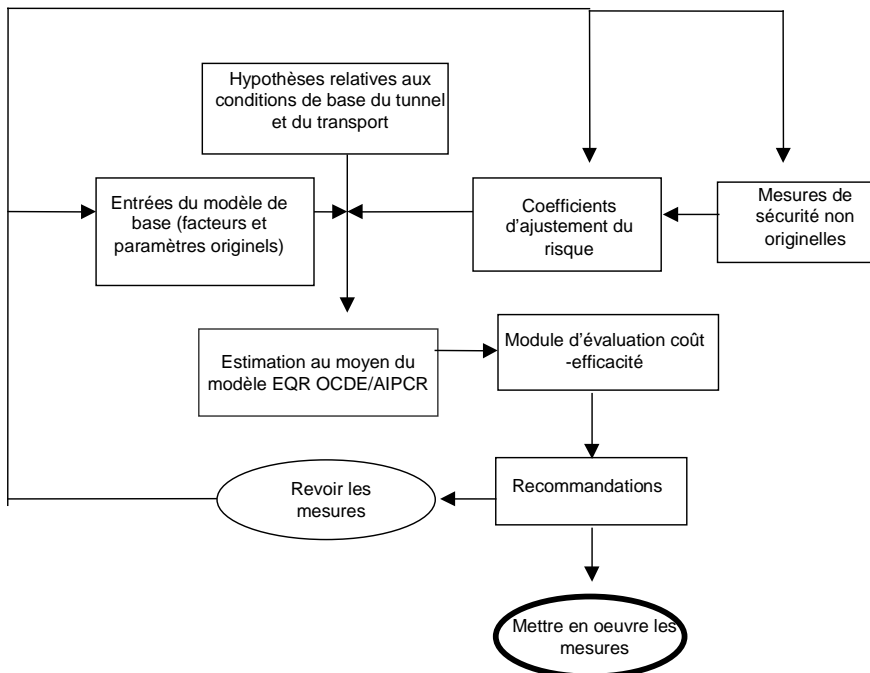
1. Définition d'un cas de base pour l'analyse (hypothèses, conditions et données de risques).
2. Estimation des risques (probabilité et conséquences) en utilisant le modèle EQR (avec des mesures « originelles » en entrée).
3. Élaboration d'une liste de mesures « non originelles » intéressant les responsables des tunnels et les décideurs.
4. Établissement d'un lien entre les mesures « non originelles » et leur influence sur les composantes de risque du modèle ; obtention des coefficients d'ajustement du risque pour les différents composants du risque.
5. Prise en compte de l'incertitude dans les valeurs des coefficients d'ajustement.
6. Obtention des estimations révisées du risque et évaluation du rapport coût-efficacité de ces mesures.

Ce cadre fournit un lien formel entre les estimations du risque ajustées pour différentes mesures de sécurité et un module de décision. Le module de décision examine le rapport coût-efficacité de chaque mesure de sécurité et il produit des recommandations pour la mise en œuvre et les révisions.

L'effet combiné, sur chaque composant du risque, de l'incertitude dans les coefficients d'ajustement est obtenu en appliquant des méthodes de type Monte-Carlo pour générer un échantillon aléatoire de valeurs pour chaque facteur en se fondant sur sa distribution log-normale sous-jacente. Une expression de probabilité combinée est utilisée pour combiner les échantillons en entrée des coefficients d'ajustement pour obtenir un échantillon de valeurs pour chaque composant du risque. Ces valeurs sont ajustées à une distribution en appliquant des méthodes empiriques. Dans cette partie, l'analyse a été limitée au transport de liquides inflammables en citerne dans un tunnel mono-tube avec une voie dans chaque direction. Les risques sont estimés pour la « section dans le tunnel », de sorte

que les différences de risque dans les zones de transition (entrée et sortie du tunnel) sont ignorées. Tout en reconnaissant que le risque lié au transport de marchandises dangereuses est un processus complexe, avec un large spectre de probabilités et de conséquences, dans cette partie on a simplifié le traitement de quelques composants du risque ou de quelques conséquences à forte probabilité. Ceci est illustré dans la figure 7.2.

Figure 7.1. **Modification du modèle EQR pour les mesures non originelles**



Un arbre d'événements similaire a été établi lorsque l'événement déclencheur n'est pas un accident, avec répétition de tous les événements qui s'ensuivent, et on a estimé les probabilités de base.

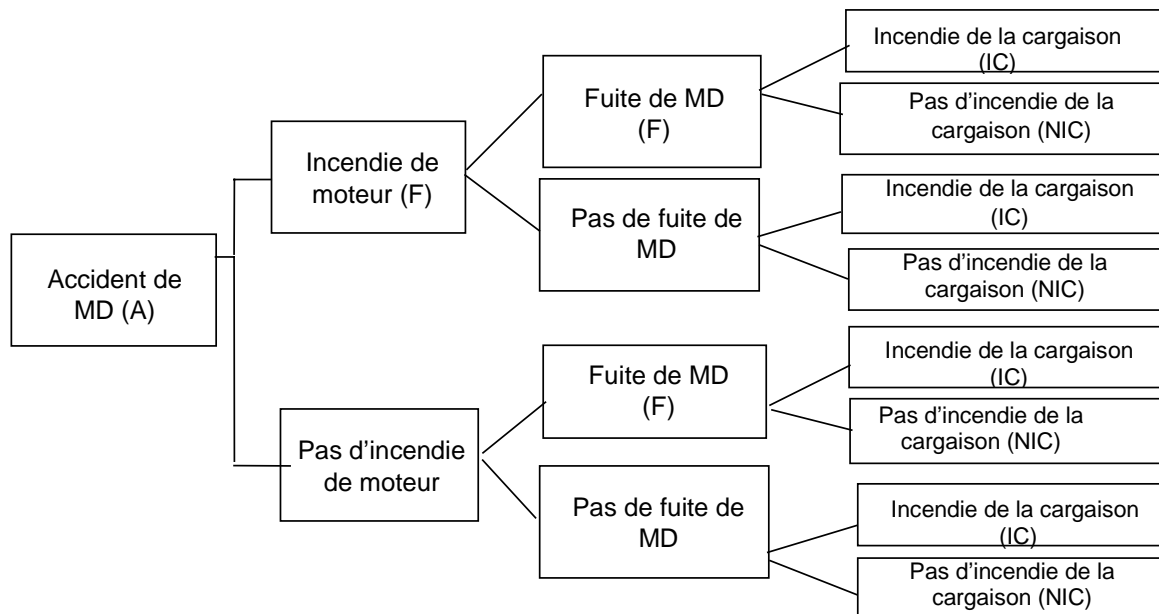
Les probabilités des composants du risque le long de chaque branche de la figure 7.2 sont exprimées sous la forme de probabilités combinées de toutes les branches précédentes, calculées à partir des probabilités du cas de base qui servent de point de départ pour la comparaison des risques ajustés suite à l'introduction de mesures de sécurité spécifiques.

La phase I de l'étude a permis de constituer la liste des mesures non originelles du tableau 7.1 qui reflètent cinq grands types de contrôle, à savoir la conception du tunnel, la détection des incidents, le contrôle du trafic, la régulation du trafic et la réponse d'urgence. Cinq mesures de sécurité représentatives de la liste originale du groupe de travail sont examinées ci-après :

- Passage de rien à une structure de tunnel résistant à l'incendie.
- Variation de la limitation de vitesse (réduction de 20 kilomètres/heure)
- Passage de l'absence d'escorte à une escorte derrière les véhicules de marchandises dangereuses.

- Installation d'une télévision en circuit fermé alors qu'il n'y en avait pas.
- Passage de rien à des équipements adéquats résistant à l'incendie.

Figure 7.2. **Arbre des événements pour les composants de base du risque étudiés dans cette partie**
L'arbre considère l'accident impliquant des marchandises dangereuses comme l'événement déclencheur



Estimateurs des composantes du risque et coefficients d'ajustement

On a estimé le facteur d'ajustement pour chacune des 15 entrées composantes du risque examinées, pour les mesures de réduction du risque, cas de tunnel et scénarios d'accident.

On suppose que ces coefficients d'ajustement obéissent à une distribution log-normale unique, dont la moyenne est égale aux estimations et dont l'écart-type est supposé dans chaque cas égal à 10 % de la moyenne. Le contrôle de la vitesse fait exception dans la mesure où la diversité des opinions indiquait une incertitude plus importante (20 %). Pour refléter l'incertitude dans les estimations du coefficient d'ajustement, on a généré un échantillon de 20 000 nombres aléatoires. Les échantillons ont été combinés en utilisant la relation de probabilité combinée associée à chaque composante du risque. Ceci a fourni une estimation combinée du risque et la distribution correspondante pour chacune des composantes examinées.

Pour chacune des composantes du risque, on a obtenu un certain nombre de statistiques utiles. Le tableau 7.4 résume les estimations par composante du risque des moyennes, du 10^{ème} et du 90^{ème} pourcentiles pour chacune des mesures de sécurité et pour le cas de base. On y trouve également une estimation de la probabilité de dépassement de l'estimation pour le cas de base par des valeurs de la distribution du risque consécutive à l'introduction de chaque mesure de sécurité et à ses ajustements.

Les mérites relatifs de l'introduction de chaque mesure de sécurité peuvent être comparés graphiquement avec les estimations du risque pour le cas de base. Ceci est illustré dans la figure 7.3

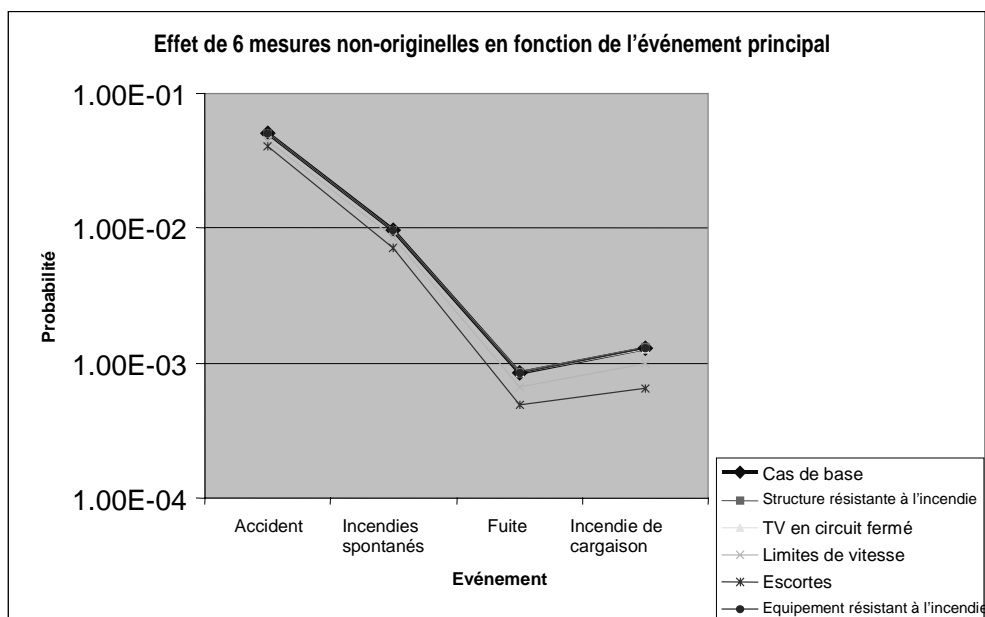
pour les moyennes de chacune des mesures étudiées dans cette partie. Un graphique analogue peut être établi pour chacun des indicateurs statistiques générés par la simulation.

Tableau 7.4. **Estimations par composante du risque des moyennes, 10^{ème} et 90^{ème} percentiles et probabilité de dépasser le cas de base**

	Unité	Cas de base			Structure résistant à l'incendie				TV en circuit fermé			
	par X années	Moyenne	10 %	90 %	Moyenne	10 %	90 %	P X>base	Moyenne	10 %	90 %	P X>base
Accident	100	5.0	4.4	5.7	5.0	4.4	5.7	45 %	5.0	4.4	5.6	45 %
Incendies spontanés	1 000	9.7	8.3	11.3	9.7	8.3	11.3	45 %	9.8	8.4	11.2	45 %
Fuite	10 000	8.4	6.9	10.0	8.5	7.0	10.0	55 %	8.4	6.9	9.9	45 %
Incendies de cargaison	1 000	1.3	1.0	1.6	1.3	1.1	1.6	50 %	1.3	1.0	1.5	40 %

	Unité	Baisse de la limite de vitesse				Escorte des marchandises dangereuses				Équipements de lutte contre l'incendie			
	par x années	Moyenne	10 %	90 %	P x>base	Moyenne	10 %	90 %	P x>base	Moyenne	10 %	90 %	P X>base
Accident	100	4.5	3.4	5.7	25 %	4.0	3.5	4.5	5 %	5.0	4.4	5.6	45 %
Incendies spontanés	1 000	8.5	6.4	11.0	25 %	7.2	6.1	8.3	5 %	9.7	8.3	11.3	45 %
Fuite	10 000	6.6	4.8	8.5	10 %	4.9	4.1	5.8	0 %	8.4	6.9	10.2	45 %
Incendies de cargaison	1 000	1.0	0.7	1.3	10 %	0.6	0.5	0.8	5 %	1.3	1.0	1.6	45 %

Figure 7.3. **Composante du risque : moyennes pour les différentes mesures de sécurité et le cas de base**



Résultats

Les résultats présentés dans cette partie suggèrent que l'introduction d'une structure résistante à l'incendie et l'accès à des équipements résistants à l'incendie n'ont que peu ou pas d'influence sur les probabilités de risque comparés au cas de base (pas de changement). Ce résultat était prévisible puisque ces mesures sont conçues pour réduire les dommages associés aux marchandises dangereuses et aux événements incendie plutôt que pour en diminuer la probabilité d'occurrence. L'introduction d'un système de télévision tout au long du tunnel n'a eu qu'un effet de réduction négligeable sur le risque d'un incendie de cargaison. Les effets de réduction du risque les plus importants sont ceux liés à une baisse de la limite de vitesse et à l'escorte des véhicules transportant des marchandises dangereuses. C'est le recours à des escortes qui a l'effet le plus important sur la réduction de toutes les composantes du risque à savoir l'accident, l'incendie de moteur, la fuite et l'incendie de cargaison.

A partir d'une analyse distincte pour le même cas de base, on a conclu que les mesures de sécurité suivantes n'ont que peu, sinon pas d'influence sur la probabilité du risque :

- Passage de rien à une résistance convenable à l'explosion.
- Passage de l'éclairage normal à l'éclairage maximal en cas d'urgence.
- Passage de l'éclairage normal à des plots lumineux pour l'évacuation.
- Augmentation de 1 à 50 mètres de la distance entre véhicules à l'arrêt.
- Remplacement des équipes de secours normales par des équipes spéciales postées aux têtes du tunnel.

L'analyse dans cette partie s'applique aux liquides inflammables. Pour les liquides toxiques, corrosifs et non combustibles, l'analyse porte essentiellement sur la probabilité de fuite et d'incendie de moteur.

Conclusions

La procédure décrite dans cette partie permet une extension d'un modèle existant d'Évaluation Quantitative du Risque assez poussé pour inclure les mesures de réduction du risque qui ne rentraient pas dans la spécification initiale du modèle. Ceci a été fait sans obtention de données nouvelles ni sans entraîner de re-spécification des principaux éléments du modèle existant. L'application initiale de la procédure à un tunnel et à un type de marchandises dangereuses spécifiques a débouché sur des résultats prometteurs, fournissant ainsi aux décideurs des informations utiles sur les mérites relatifs des mesures de sécurité envisagées.

Évaluation des mesures de réduction du risque « non originelles » qui visent les temps de réponse

Introduction

En vue de développer et étendre les capacités du modèle EQR, une étude a été conduite par Hall *et al.* (2000) afin d'apprécier le rapport coût-efficacité d'un éventail de mesures de réduction du risque actuellement employées dans les tunnels routiers.

Les objectifs étaient de :

- Développer une méthodologie d'analyse des mesures de réduction du risque dépendantes du temps.
- Estimer les effets des mesures « non originelles » de réduction du risque.
- Estimer les coûts approximatifs des mesures « originelles » et « non originelles ».

L'efficacité de certaines mesures de réduction du risque est liée à la manière dont elles font diminuer les délais pour les occupants, les exploitants des tunnels et les services de secours en réponse à une urgence. Par exemple, dans un tunnel équipé d'une télévision en circuit fermé ou d'un système de détection automatique des incidents de circulation, l'évacuation peut être déclenchée en quelques minutes alors qu'en l'absence de tels systèmes il peut s'écouler un délai important avant le début de l'évacuation. Ainsi, de tels systèmes peuvent avoir un effet sur les délais de mise en mouvement pour l'évacuation et donc un effet sur le nombre de blessés et tués. Si on peut identifier les intervalles de temps appropriés, le modèle EQR peut servir à quantifier ces effets en modifiant les délais de mise en mouvement par défaut.

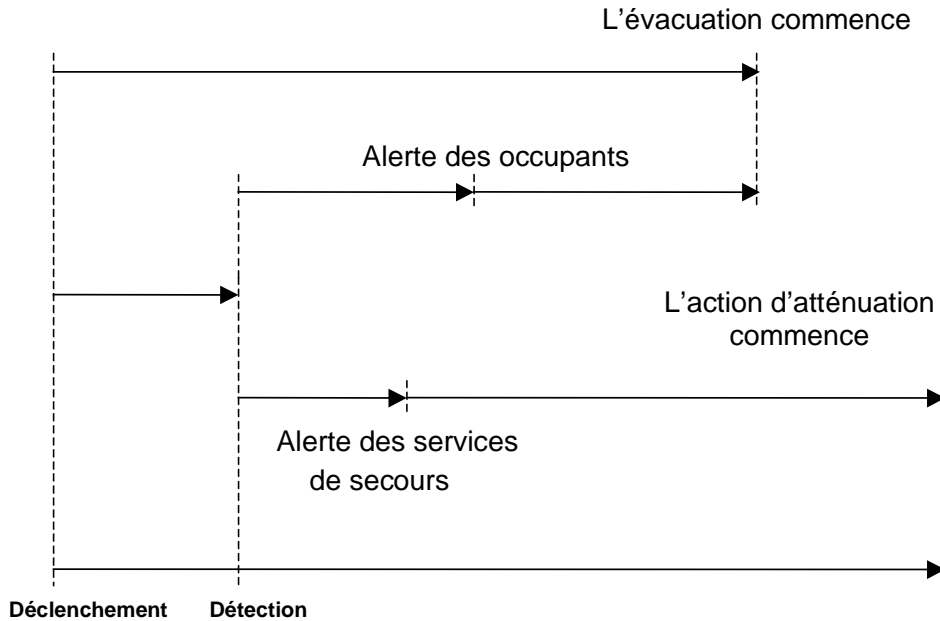
Méthodologie

La séquence des événements qui font suite à un incident dans un tunnel peut être représentée par un certain nombre de phases distinctes comme le montre la figure 7.4.

Vient tout d'abord une phase de détection, avec un intervalle de temps fini entre le déclenchement de l'incident et la détection. Il convient ensuite de considérer deux déroulements distincts. L'un concerne la réponse des occupants et les implications pour la sécurité de leur vie. Après la détection d'un incident, il y a une phase d'alerte au cours de laquelle les occupants du tunnel à une certaine distance de l'incident prennent conscience de la nécessité de l'évacuation. A cet égard, il peut être approprié de considérer les usagers du tunnel situés à au moins 100 mètres de l'incident. A cette distance, la nature de l'incident et le risque potentiel ne seront probablement pas apparents. Une fois que les usagers du tunnel ont pris conscience de la nécessité d'évacuer, il s'écoule en général encore un peu de temps avant qu'ils ne commencent effectivement à bouger. Ceci est appelé la phase de mise en mouvement et elle dépend d'une grande diversité de facteurs.

Le second déroulement concerne la réponse des secours destinée à atténuer les conséquences et les effets des mesures de réduction du risque sur la gravité du danger. Après la détection d'un incident il s'écoule un intervalle de temps fini avant que les services de secours ne prennent conscience de la nécessité de répondre. Cette phase est dite d'alerte des moyens d'atténuation. Il s'écoule encore un intervalle de temps supplémentaire avant que les actions d'atténuation, comme la lutte contre l'incendie, puissent effectivement démarrer sur la scène de l'accident. Ceci est important car il peut falloir plusieurs minutes à la brigade de pompiers la plus proche pour se mobiliser, parvenir à l'entrée du tunnel puis atteindre le lieu de l'accident.

Figure 7.4. Séquence des événements



On a utilisé des données d'incidents déclarés pour obtenir les intervalles de temps probables pour les délais d'alerte, de détection, et d'action d'atténuation.

Principes méthodologiques

L'approche implique la considération des intervalles de temps de réponse pour chaque phase. On peut utiliser différentes catégories de réponse, telles que « rapide », « moyenne » et « lente », comme on le voit ci-dessous pour la détection.

Catégorie	Temps de détection
Rapide	$\Delta t_d \leq 1 \text{ mn}$
Moyenne	$1 \text{ mn} < \Delta t_d \leq 5 \text{ mn}$
Lente	$5 \text{ mn} < \Delta t_d \leq 10 \text{ mn}$

La probabilité pour que la réponse tombe dans l'une ou l'autre de ces catégories doit être estimée en faisant appel au jugement « d'expert » (à supposer qu'on ne dispose d'aucune donnée). Il peut pour cela être plus commode d'utiliser les probabilités cumulées comme ci-après :

Catégorie	Temps de détection cumulé	Probabilité cumulée de détection
Rapide	$\Delta t_d \leq 1 \text{ mn}$	50 %
Moyenne ou mieux	$\Delta t_d \leq 5 \text{ mn}$	90 %
Lente ou mieux	$\Delta t_d \leq 10 \text{ mn}$	100 %

Pour chaque catégorie, on peut dériver la probabilité discrète des valeurs cumulées.

Catégorie	Temps de détection	Probabilité de détection
Rapide	$\Delta t_d \leq 1 \text{ mn}$	50 %
Moyenne	$1 \text{ mn} < \Delta t_d \leq 5 \text{ mn}$	40 %
Lente	$5 \text{ mn} < \Delta t_d \leq 10 \text{ mn}$	10 %

Le nombre d'intervalles de temps n'est pas limité à trois mais il dépend de la précision de la connaissance de la performance.

Ayant déterminé des catégories de réponse, des intervalles de temps et des probabilités différents, on peut ensuite les combiner pour déterminer les temps globaux de réponse des occupants et des mesures d'atténuation ainsi que les probabilités globales. On utilise pour cela le concept d'arbres des événements-temps. Ils ressemblent à un arbre des événements classique. La seule différence est qu'ils font référence aux intervalles de temps plutôt que directement aux conséquences.

En résumé, l'approche recouvre les étapes élémentaires suivantes :

- Sélectionner les catégories de réponse, les intervalles de temps et les probabilités qui conviennent pour chacun des intervalles de temps de détection, d'alerte des occupants et des moyens d'atténuation, de mise en mouvement et de pré-action d'atténuation.
- Combiner les intervalles de temps et leurs probabilités associées pour déterminer les temps globaux de réponse de l'occupant et des actions d'atténuation ainsi que leurs probabilités.

Outre ces étapes élémentaires, il faut examiner l'effet de la réponse en vue d'atténuer les conséquences. Il sera différent pour les incendies, les BLEVE, les explosions de nuages de vapeur et les fuites de toxiques.

- Pour les incendies, il faut prendre en compte le rythme de développement et le temps mis pour atteindre certaines dimensions critiques (par exemple 0.25, 3, 20 et 100 MW) pour estimer la probabilité de pouvoir contrôler l'incendie en le combattant (action d'atténuation).
- Pour les BLEVE, on suppose que si l'incendie atteint un certain seuil, par exemple 3 MW, un BLEVE va se produire. Il faut prendre en compte le temps mis à atteindre cette puissance de l'incendie pour estimer la probabilité de pouvoir prévenir le BLEVE en combattant l'incendie (action d'atténuation).
- Pour les explosions de nuages de vapeur (VCE), les actions d'atténuation portent sur la prévention de l'ignition.

Cette méthode permet d'estimer les combinaisons de mesures de réduction du risque dans les tunnels. La combinaison la plus efficace de mesures devrait minimiser les phases de détection, d'alerte des occupants et des moyens d'atténuation, de mise en mouvement et de pré-action d'atténuation.

L'enquête n'a pas permis d'obtenir d'information quantitative sur les effets de ces mesures de réduction du risque.

Actuellement, le modèle EQR prédit les effets du drainage, des issues de secours et de la ventilation. On peut intégrer au modèle les effets des mesures de réduction du risque dépendantes du temps en spécifiant certains paramètres d'entrée, qui sont dépendants des temps de détection, d'alerte

et de mise en mouvement. En particulier, le modèle EQR demande à l'utilisateur d'entrer le temps de mise en action de la ventilation de secours et, en l'absence de ventilation pour contrôler les fumées, ceci correspond directement au temps de détection et d'alerte. En outre, l'usager doit spécifier le type de système de communication d'urgence et ceci est en rapport étroit avec le calcul des temps de mise en mouvement des occupants.

Estimations des effets du modèle EQR

On a développé un questionnaire qui a été adressé à plusieurs exploitants de tunnel en Europe afin de recueillir des informations sur l'efficacité et le coût des diverses mesures de réduction du risque. Le tableau 7.5 présente une synthèse des mesures que l'on rencontre dans un certain nombre de tunnels en Europe.

Tableau 7.5. **Synthèse des mesures *non originelles* de réduction du risque mises en œuvre dans les tunnels**

Mesure de réduction du risque	Tunnel V	Tunnel H	Tunnel W	Tunnel S	Tunnel O	Tunnel C	Tunnel T
Téléphones de secours	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Communications radio	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Détection des incidents de circulation			✓	✓	✓	✓	✓
Télévision en circuit fermé	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Détection d'incendie	✓			✓			
Équipements de lutte contre l'incendie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Équipements résistant à l'incendie			✓	✓	✓	✓	✓
Structure résistant à l'incendie	✓	✓	✓		✓		✓
Structure résistant à l'explosion	✓						
Interdiction de dépasser			✓	✓			✓
Limitation de vitesse			✓				
Distance entre véhicules					✓		✓
Système d'identification des véhicules							
Escorte							✓
Équipes de secours							✓
Éclairage	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Panneaux/signaux d'alerte	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Plan d'action	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Le tableau 7.6 présente les hypothèses de probabilité pour les temps de détection, d'alerte et de mise en mouvement pour quatre variantes de tunnel T1 à T4. Le tableau 7.7 donne les temps de réponse correspondants : les estimations du meilleur, du moyen et du pire renvoient à la fourchette de résultats de l'arbre des événements-temps. Les estimations du meilleur, du moyen et du pire correspondant à des probabilités cumulées de 10 %, 50 % et 90 % respectivement.

Tableau 7.6. Estimation des probabilités pour les catégories de tunnel

	Détection			Alerte			Mise en mouvement			
	Pd1	Pd2	Pd3	Pa1	Pa2	Pa3	Pp1	Pp2	Pp3	Pp4
T1	0.50	0.50	0.00	0.50	0.50	0.00	0.40	0.30	0.20	0.10
T2	0.40	0.50	0.10	0.30	0.50	0.20	0.20	0.30	0.30	0.20
T3	0.30	0.60	0.10	0.05	0.45	0.50	0.10	0.20	0.30	0.40
T4	0.05	0.45	0.50	0.05	0.45	0.50	0.00	0.20	0.30	0.50

Tableau 7.7. Prévission des temps de détection, d'alerte et de mise en mouvement

	Détection et alerte (minutes)			Mise en mouvement (minutes)		
	Meilleur	Moyen	Pire	Meilleur	Moyen	Pire
T1	0.8	4.0	5.2	1.5	4.7	15.0
T2	1.7	4.2	11.0	2.0	8.0	20.0
T3	4.0	9.0	11.0	3.0	12.7	22.5
T4	4.5	10.8	14.0	5.5	15.0	23.0

Comme mentionné précédemment, dans le modèle EQR, les temps de mise en mouvement dépendent du type de système d'alerte. Les types de système d'alerte sont les suivants : W0 = Pas de système d'alerte, W1 = Cloche, sirène d'alarme ou dispositif analogue, W2 = Système d'information du public délivrant des messages préenregistrés, W3 = Système d'information du public et télévision en circuit fermé. Le Tableau 7.8 reprend les principaux paramètres d'entrée du modèle EQR liés aux temps de réponse pour chacune des catégories de tunnel. Le modèle EQR a été utilisé pour prédire les distances au-delà desquelles les décès vont intervenir en cas d'incendie ; une synthèse des résultats se trouve dans le tableau 7.9.

Tableau 7.8. Paramètres d'entrée du modèle d'Évaluation Quantitative du Risque

Paramètres d'entrée du modèle d'Évaluation Quantitative du Risque		T1	T2	T3	T4
Temps de détection et alerte (minutes)	tE	1	2	5	10
Type de système d'alerte	Ecoms	W3	W2	W1	W0
Meilleure estimation du temps de mise en mouvement (minutes)		1	2	3	5

Tableau 7.9. Prévission des distances (m) au-delà desquelles les décès surviennent en cas d'incendie

		T1	T2	T3	T4
Poids lourds	≥ 90 % de décès	19	34	45	64
	Incendie de 20 MW				
	≥ 50 % de décès	36	53	68	99
	≥ 10 % de décès	55	79	104	146
Poids lourds	≥ 90 % de décès	160	186	204	222
	Incendie de 100 MW				
	≥ 50 % de décès	189	212	239	279
	≥ 10 % de décès	216	260	287	333
Feu de nappe de carburant	≥ 90 % de décès	218	252	273	305
	≥ 50 % de décès	256	287	315	370
	≥ 10 % de décès	287	336	373	489

Ceci indique qu'il y aurait par exemple une section de 19 mètres du tunnel T1 dans laquelle 90 % ou plus des occupants seraient tués et une section de 34 mètres dans laquelle 50 % ou plus des occupants seraient tués (ceci inclut la zone à 90 % de risque). Le nombre effectif de tués dépend du nombre de personnes présentes dans chaque zone. Les principales observations sont :

- Pour les scénarios incendie de 100 MW et feu de nappe, les fourchettes de décès sont d'environ 15-20 % plus élevées pour T2 que pour T1, d'environ 25-30 % plus élevées pour T3 que pour T1 et d'environ 40-70 % plus élevées pour T4 que pour T1.
- Pour l'incendie de 20 MW, les augmentations dans les fourchettes de décès sont plus fortes, toutefois la résolution des prédictions du modèle EQR est plutôt mauvaise pour les fourchettes de décès très étroites.

En conclusion, on peut voir que la méthodologie fournit un moyen de distinguer les effets des différents temps de réponse et ainsi des différentes mesures de réduction du risque dépendant du temps. Si les coûts associés à chaque mesure sont connus, on peut utiliser le modèle EQR pour estimer le rapport coût-efficacité.

On a présenté une méthodologie qui permet à un utilisateur expert du modèle EQR de réaliser des estimations des effets des mesures de réduction du risque sur l'évolution dans le temps d'un incident qui implique des marchandises dangereuses. En outre, les étapes impliquées dans cette méthodologie peuvent aider à identifier des relations importantes entre les mesures de réduction du risque et les intervalles de temps de réponse, par exemple détection, alerte, mise en mouvement et atténuation.

Discussion

La flexibilité de cette méthodologie permet aux usagers de définir leurs propres paramètres d'intervalle de temps, ce qui permet d'adapter la méthode à chaque tunnel. On a ainsi un moyen de comparer les effets des éventuels améliorations, remplacements ou suppressions des mesures existantes de réduction du risque dans un tunnel. L'application de la méthodologie avec le modèle EQR a été illustrée pour un ensemble de cas hypothétiques de tunnel.

Il n'est pas possible de produire des recommandations générales sur la hiérarchisation des mesures de réduction du risque, puisque leur efficacité dépend du tunnel considéré.

Les données de coût obtenues par le biais du questionnaire et de l'analyse bibliographique sont soit trop limitées soit trop variables pour tirer quelque conclusion que ce soit relative au rapport coût-efficacité des mesures en termes de sécurité de la vie des personnes ou de réduction des dommages structurels.

Remarques de conclusion

L'objectif de ce travail était de recommander les mesures de réduction du risque qui sont spécifiques à des tunnels donnés, pour lesquels on pouvait mener des spécifications détaillées et des évaluations d'un bon rapport coût-efficacité pour tenir compte des risques impliqués.

Au cours de la phase I, on a développé la liste des mesures de réduction du risque (tableau 7.1) qui visent à réduire la probabilité de survenue et les conséquences des accidents. On a réalisé une analyse bibliographique et recueilli des informations par le biais d'un questionnaire auquel ont répondu les exploitants de 14 tunnels européens. Pour comparer les différentes mesures, on a considéré trois catégories pour classer l'effet et le coût de chaque mesure : faible, moyen et élevé. Le

résultat est une approche simple (la matrice 3x3 du tableau 7.2) qui peut apporter pour les différentes mesures, des indications quantitatives préliminaires en matière d'effets sur les coûts et les victimes ou d'effets de réduction des dommages.

La phase II recouvre trois études avec des approches quantitatives plus détaillées pour aider à évaluer le rapport coût-efficacité.

Dans la première étude, on a entrepris un certain nombre de tests de sensibilité pour étudier comment les résultats du modèle EQR sont affectés par des variations dans un ensemble de mesures « originelles » de réduction du risque. Les résultats illustrent la sensibilité des effets physiques à des ajustements des mesures « originelles ».

La seconde étude visait à concevoir une procédure pour introduire les mesures « non originelles » de sécurité directement dans le modèle EQR, de façon à pouvoir les évaluer objectivement. La procédure permet une extension d'un modèle existant assez complet d'Évaluation Quantitative du Risque, pour inclure des mesures de sécurité qui ne faisaient pas partie de la spécification initiale du modèle. La première application de la procédure à un tunnel et à un type de marchandises dangereuses spécifique a produit des résultats prometteurs, qui apportent aux décideurs des informations utiles quant aux mérites relatifs des mesures de sécurité examinées.

La troisième étude visait à développer une méthodologie pour permettre à un utilisateur expert du modèle EQR de réaliser des estimations des effets des mesures de réduction du risque sur l'évolution dans le temps d'un incident. La méthodologie fournit un moyen de comparer quantitativement les effets des différentes mesures de réduction du risque ou combinaisons de telles mesures. En outre, les étapes impliquées dans cette méthodologie peuvent aider à identifier des relations importantes entre les mesures de réduction du risque et les intervalles de temps de réponse, par exemple détection, alerte, mise en mouvement des occupants du tunnel et pré-action d'atténuation. On a ainsi un moyen de comparer les effets des éventuels améliorations, remplacements ou suppressions des mesures existantes de réduction du risque dans un tunnel.

Globalement, les études menées ont fourni des méthodes qualitatives et quantitatives pour l'analyse des effets des mesures de réduction du risque. En utilisant le modèle EQR conjointement avec ces approches, il est possible d'apprécier les effets des mesures à la fois « originelles » et « non originelles » pour un tunnel spécifique. Il n'a pas été possible de dégager un effet général des mesures applicable à tous les tunnels puisque les mesures peuvent avoir des effets différents dans chaque (type de) tunnel.

Les données de coût recueillies au cours des études étaient soit trop limitées soit trop variables pour tirer quelque conclusion que ce soit relatif au rapport coût-efficacité des mesures en termes de sécurité de la vie des personnes ou de réduction des dommages structurels. Toutefois, si l'on dispose des données de coût relatives aux mesures concernées, on peut réaliser une évaluation coût-efficacité en utilisant le EQR conjointement avec les méthodologies décrites ci-dessus.

RÉFÉRENCES

- AIPCR (1999), Comité des Tunnels Routiers, *Maîtrise de l'incendie est des fumées dans les tunnels routiers*, Paris.
- AIPCR (à paraître), *Review and Evaluation of Measures to Reduce the Risk Related to Dangerous Goods Transport in Road Tunnels (Synthesis of Task 3)*, Paris.
- COWI (2000), « Decision Support Model (DSM) », by COWI for OECD ERS2 Group, Report No. 42069 - 006, Issue No. 2, avril.
- Hall, R.C. et Y. Luong (2000), « Assessment of Risk Reduction Measures Related to Response Times », WS Atkins Consultants Ltd, Ref. CL3002-R1, mai.
- OCDE et AIPCR (1996), *Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels: Current National and International Regulations (Report 1)*, (disponible sur Internet : <http://www.oecd.org/dsti/sti/transport/road/index.htm>)
- OCDE et AIPCR (1997), *Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels : Current National and International Regulations (Report 2)*, (disponible sur Internet : <http://www.oecd.org/dsti/sti/transport/road/index.htm>)
- Pons, P. (2000), « Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels. ERS2 Project Task 3: Sensitivity Study on 'Native' Measures », INERIS Rap22460_ab.
- Saccomanno, F. et P Haastруп (2000), « Influence of Safety Measures on the Risks of Transporting Dangerous Goods through Road Tunnels », papier présenté à la Conférence « Risk Analysis », février.
- Van Der Sluis, J., D.A. Schreuder, J.M.J. Bos et C.C. Schoon (1998), « Hazardous Material Transport through Tunnels: Investigation into Measures to Reduce the Risk of Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels », SWOV Institute for Road Safety Research, Pays-Bas, rapport rédigé pour le Comité n° 5 de l'AIPCR sur les Tunnels Routiers.

GLOSSAIRE

AIPCR	Association Mondiale de la Route
BLEVE	Explosion de vapeur en expansion provenant d'un liquide en ébullition
CCTV	Télévision en circuit fermé
EQR	Évaluation quantitative du risque
EQR	Modèle d'évaluation quantitative du risque
ERS2	Projet de recherche conjoint OCDE/AIPCR sur le transport des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
MAD	Modèle d'aide à la décision
MD	Marchandise dangereuse
Mesures originelles	Mesures de réduction du risque dont les effets sont intégrés dans le modèle EQR
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
ORT	Temps de réponse de l'occupant
PL	Poids lourd
VCE	Explosion d'un nuage de vapeur

ANNEXE

LISTE DES PARTICIPANTS

Comité Exécutif ERS2 conjoint OCDE/AIPCR

Président : Dr Kaare Flaate

Norvège	Dr Kaare Flaate
Pays Bas	M. Dick van de Brand M. Rein van Dijk
Royaume Uni	Mme Finella McKenzie M. Matthew White
Suisse	M. Michel Egger M. Michel Pigois
AIPCR	M. Jean-François Coste
Commission européenne	M. Olli Pirkanniemi
OCDE	M. Ceallach Levins Dr Anthony Ockwell

Groupe d'experts scientifiques conjoint OCDE/AIPCR ERS2

Président : M.D. Lacroix (France)
Vice-Président : M.J. Hart (Royaume Uni)

Autriche	Prof. Hermann Knoflacher
Belgique	M. Jozef de Groof
Danemark	Prof. Niels Jørgensen
Espagne	M. Javier Lanz M. Rafael Lopez Guarga
États Unis	M. Anthony Caserta
France	M. André Gastaud M. Didier Lacroix
Italie	M. Enrico Sammartino M. Emanuel Scotto
Japon	M. Hideto Mashimo
Norvège	M. Finn Harald Amundsen
Pays-Bas	M. Jelle Hoeksma Mme Manon Kruiskamp M. Liong Tan
Royaume-Uni	M. Jeffrey Hart M. John Potter Dr Nigel Riley
Suisse	M. Andreas Hofer
Commission européenne	Dr Palle Haastrup M. Olli Pirkanniemi
Développeurs du modèle EQR	M. Philippe Cassini (INERIS) M. Philippe Pons (INERIS) M. Robin Hall (WS Atkins) Prof. F. Saccommanno (University of Waterloo)
Développeurs du modèle MAD	Dr Inger Kroon (COWI) M. Niels Peter Høj (COWI)
OCDE	M. Ceallach Levins Dr Anthony Ockwell

Groupe de travail No. 5 sur les marchandises dangereuses du Comité AIPCR (C5) des Tunnels Routiers

Président : M. J.L. Beguin (Pays- Bas)

Autriche	M. J. Santner
Belgique	M. Jozef de Groof
Espagne	M. Javier Lanz M. Rafael Lopez Guarga
France	M. M. Pérard
Pays-Bas	M. J. L. Beguin M. Jelle Hoeksma
Royaume Uni	M. John Potter
Suède	M. A. Hakansson
Suisse	Dr David Manuel Gilabert

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
(77 2001 04 2 P) ISBN 92-64-29651-4 – n° 52168 2001