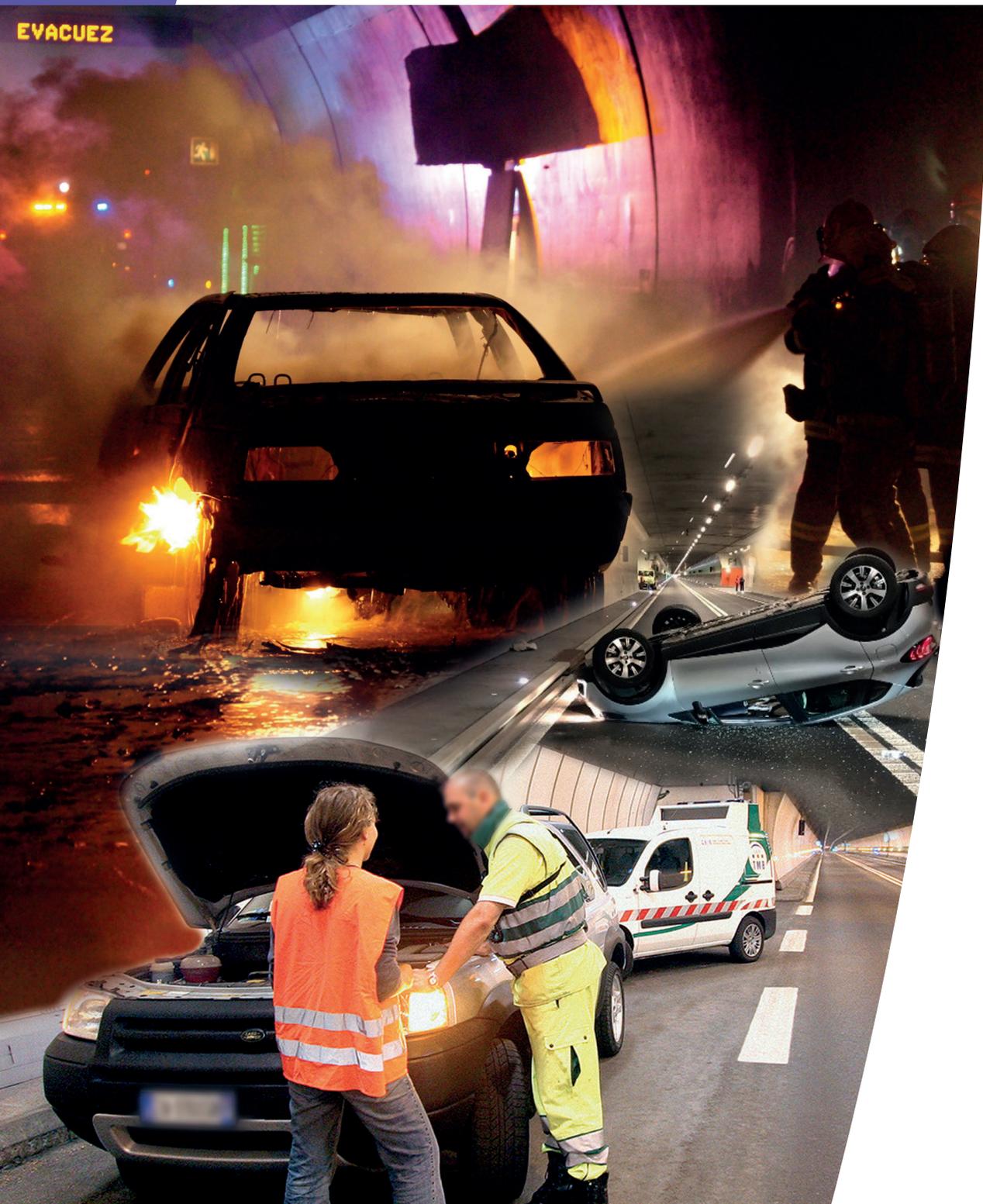


PANNES, ACCIDENTS ET INCENDIES EN TUNNEL ROUTIER

Éléments statistiques



AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

PANNES, ACCIDENTS ET INCENDIES EN TUNNEL ROUTIER

Éléments statistiques

février 2022

Centre d'Études des Tunnels

25, avenue François Mitterrand

69500 BRON – France

Tél. 33 (0)4 72 14 34 00

Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION	5
1.1 Contexte et objectifs	5
1.2 Études conduites	5
1.3 Définitions	6
1.4 Périmètre des résultats présentés	6
2 LES PANNES EN TUNNEL	8
2.1 Taux de pannes	8
2.2 Paramètres influençant le taux de pannes	8
2.2.1 Urbain/non-urbain	8
2.2.2 Type de véhicule	8
2.2.3 Déclivité du tunnel	9
2.3 Comparaison avec les taux de pannes à l'air libre	9
3 LES ACCIDENTS EN TUNNEL	10
3.1 Taux d'accidents en tunnel	10
3.2 Paramètres influençant le taux d'accidents	10
3.2.1 Unidirectionnel/bidirectionnel	10
3.2.2 Déclivité du tunnel	11
3.2.3 Présence d'échangeurs	11
3.3 Les accidents corporels	12
3.3.1 Taux d'accidents corporels	12
3.3.2 Paramètres influençant le taux d'accidents corporels	12
3.3.3 Gravité	12
3.3.4 Comparaison avec l'air libre	13
4 LES INCENDIES EN TUNNEL	14
4.1 Taux d'incendies en tunnel	14
4.2 Paramètres influençant le taux d'incendies	14
4.2.1 Type de véhicules	14
4.2.2 Déclivité du tunnel	14
4.2.3 Déclivité des voies d'accès	15
5 CONCLUSION	16
6 ANNEXE 1	
MISE EN PERSPECTIVE DES NOUVEAUX TAUX EN REGARD DES RÉFÉRENCES PRÉEXISTANTES	18
6.1 Taux de pannes, d'accidents et d'incendies du rapport de 1998	18
6.2 Taux d'incendie du fascicule 4 du guide des dossiers de sécurité	18
7 ANNEXE 2 – DÉMARCHE DE COLLECTE ET CONSOLIDATION DES DONNÉES	20
8 ANNEXE 3 – PRÉCISIONS SUR LES MÉTHODES STATISTIQUES EMPLOYÉES	21
8.1 Calculs de taux d'événements	21
8.2 Analyses statistiques approfondies – régressions multiples	21

INTRODUCTION

Le présent document d'information est l'aboutissement d'un travail piloté par le CETU concernant les statistiques des pannes, accidents et incendies en tunnel routier. La présente introduction rappelle les origines et objectifs de ce travail,

les études réalisées par le CETU et ses partenaires pour les mener à bien ainsi que le périmètre des résultats présentés. Le document fait ensuite état des résultats synthétiques par type d'événements : les pannes, les accidents, les incendies.

1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

Les statistiques nationales de pannes, d'accidents et d'incendies en tunnel routier ainsi que leur analyse sont utiles à plusieurs titres.

En premier lieu, elles offrent aux maîtres d'ouvrage et exploitants une perspective globale permettant de mieux mesurer les enjeux de leurs ouvrages et de nourrir leurs propres analyses. En second lieu, elles constituent un des entrants nécessaires aux analyses de risques figurant dans les dossiers de sécurité des ouvrages. Enfin, elles alimentent la recherche en sécurité des tunnels.

Ces statistiques prennent la forme de taux de survenance des événements par véhicule et kilomètre parcouru.

Le CETU a souhaité actualiser les statistiques existantes qui étaient issues du rapport de recherche du CETU « Pannes, accidents et incendies dans les tunnels routiers français » de 1998.

L'objectif de la démarche était double.

Il s'agissait tout d'abord d'améliorer la représentativité de ces taux. Certains d'entre eux reposaient sur des plages de données courtes et anciennes et/ou sur un faible nombre d'ouvrages. Les nouveaux taux établis sont donc plus précis et davantage représentatifs de l'ensemble des ouvrages (les anciens taux sont rappelés en annexe 6.1).

Il y avait ensuite lieu de rechercher et fiabiliser les paramètres influençant ces taux. Des méthodes dites « simples » avaient jusqu'alors été utilisées et permettaient d'étudier l'influence d'un unique paramètre sur un taux. Faciles d'utilisation et de présentation, elles ne permettaient néanmoins pas de tenir compte des éventuelles dépendances entre paramètres. Des méthodes approfondies ont été utilisées ici, qui permettent notamment de faire émerger les paramètres ayant une influence indépendamment des autres et, si possible, de quantifier cette influence.

1.2 ÉTUDES CONDUITES

Un travail préalable avait permis d'identifier les carences des statistiques disponibles concernant les pannes, accidents et incendies en tunnel routier. Dans la perspective de les actualiser, ce travail avait précisé le périmètre, les contraintes et les objectifs du travail de collecte et d'analyse des données, les taux de survenance à calculer, ainsi que les attendus en matière de méthodes statistiques simples et approfondies relatifs aux paramètres influents.

Une étude a ensuite été confiée au bureau d'études BG Ingénieurs Conseils assisté de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne. En première approche, les analyses conduites se sont basées sur des régressions simples, c'est-à-dire ne prenant en compte qu'un seul paramètre à la fois. Pour l'analyse des paramètres influents, la méthode approfondie qui a été utilisée est basée sur des régressions multiples impliquant plusieurs paramètres en même temps et permettant d'identifier ceux qui ont une influence indépendamment des autres.

Le CETU a analysé l'étude et ses résultats, puis mené des investigations complémentaires qui ont permis de proposer des hypothèses expliquant l'influence de certains paramètres. Des régressions simples et multiples supplémentaires ont ensuite permis de valider ces hypothèses, puis d'approfondir la question des paramètres influençant les accidents corporels. Au total plus d'une dizaine de paramètres d'influence a été considérée.

Parmi les résultats de l'ensemble de ces études, seuls ont été retenus les plus significatifs et ceux étayés par des échantillons statistiques représentatifs. Par exemple, il n'a pas été possible de rendre compte d'une évolution annuelle du taux sur l'ensemble de la période de recueil, notamment parce que la collecte des événements a été plus complète après l'installation de systèmes de détection automatique.

Des précisions sur la méthode de collecte des données, le calcul des taux et les régressions multiples sont données respectivement en annexes 7, 8.1 et 8.2.

1.3 DÉFINITIONS

Ce chapitre comporte la définition des notions utilisées dans la suite du document.

Pannes

Les pannes considérées sont celles relatives aux véhicules. Celles relatives aux équipements du tunnel ne sont pas traitées dans la présente note. Une panne est un dysfonctionnement mécanique ou électronique qui provoque l'arrêt du véhicule. Lorsqu'il a été possible de faire la distinction, les arrêts volontaires n'ont pas été considérés comme des pannes dans la collecte. Notamment, si l'arrêt est de courte durée (moins de 5 minutes) et que le véhicule redémarre sans l'aide d'un tiers ou sans que l'utilisateur n'ait besoin de sortir de son véhicule, l'événement n'a pas été répertorié comme panne.

Accidents

Un accident de la route est un choc engendrant des dégâts matériels et/ou des blessures humaines entre un engin roulant (automobile, deux-roues motorisé, vélo, etc.) et tout autre engin, obstacle ou personne. Ces dégâts peuvent être occasionnés aux véhicules, à un élément de la route ou de l'ouvrage (chaussée, panneaux, barrières de protection, etc.) ou à un élément extérieur à ceux-ci (bâtiment, mobilier urbain, arbre, etc.). Dans la suite du propos, les accidents de la route seront simplement désignés par « accidents ».

Notions de tués et de blessés

Le 1^{er} janvier 2005, afin de faciliter la comparaison des résultats d'accidentologie à ceux de ses voisins européens, la France a adopté la définition internationale du « tué » à trente jours. Jusqu'à fin 2004, une personne « tuée » était une victime décédée sur le coup ou dans les six jours après l'accident. Désormais, il s'agit d'une victime décédée sur le coup ou dans les trente jours qui suivent l'accident.

Les notions de « blessé léger » (blessé dont l'état nécessite entre zéro et six jours d'hospitalisation ou un soin médical) et de « blessé grave » (blessé dont l'état nécessite plus de six jours d'hospitalisation), en vigueur jusqu'à fin 2004, ont été respectivement remplacées par les notions de « blessé non hospitalisé » et de « blessé hospitalisé ». Un blessé non hospitalisé est une victime ayant fait l'objet de soins médicaux mais n'ayant pas été admis comme patient à l'hôpital plus de 24 heures. Un « blessé hospitalisé » est une victime admise comme patient dans un hôpital plus de 24 heures. Les personnes indemnes sont des impliqués non victimes de l'accident.

Incendies

Un incendie est une combustion générant une flamme (définition permettant d'exclure les dégagements de fumée sans incendie ou autres suspicions d'incendie du type « casse turbo »).

Taux d'incertitude

Un taux d'incertitude correspond à la probabilité que le résultat d'une régression multiple (cf. 8.2) soit le fruit du hasard. Par exemple, un taux d'incertitude de 1 % signifie que le résultat a moins d'une chance sur mille d'être le fruit du hasard. L'influence de chaque paramètre a également été quantifiée. Dans le présent document, un résultat est considéré comme statistiquement significatif dès lors que son taux d'incertitude est inférieur au seuil de 6 %.

Rampe et pente

Par convention¹, on appelle « rampe » une déclivité dans le sens montant, et « pente » une déclivité dans le sens descendant.

1.4 PÉRIMÈTRE DES RÉSULTATS PRÉSENTÉS

Le CETU a choisi de considérer les tunnels de plus de 300 m avec un degré de surveillance² D3 ou D4. Les tunnels de degré D1 ou D2 n'ont pas été retenus³ car les pannes et certains accidents ne peuvent y être systématiquement répertoriés⁴.

21 exploitants sollicités par le CETU ont accepté de participer à la démarche, ce qui représente 25 postes de contrôle (PC).

1. Cf. chapitre 4 du *Dossier Pilote Géométrie* du CETU.

2. En référence au § 5.1.1 – Degrés de permanence et de surveillance de l'IT 2000.

3. Excepté deux ouvrages équipés de caméras de surveillance et pour lesquels le retour d'expérience était suffisant.

4. Avec un degré D1 ou D2 il n'y a pas de surveillance continue, les événements ne sont détectés qu'en cas de déclenchement d'une alarme technique ou d'un appel d'urgence d'un usager.

96 ouvrages ont ainsi permis de constituer l'échantillon des données. Ils représentent plus de 70 % du linéaire des tunnels français de plus de 300 m. Les catégories unidirectionnelle/bidirectionnelle, urbain/non urbain font référence à celles définies et utilisées dans l'IT 2000. Le nombre de tunnels est représenté dans le tableau 1.

Type de tunnels	Nombre de tunnels
Tous	96
À circulation unidirectionnelle	74
À circulation bidirectionnelle	22
Urbain	53
Non urbain	43

Tableau 1 : Nombre d'ouvrages par catégories de l'IT 2000

Par souci d'homogénéité entre les différentes sources d'information et afin d'optimiser la fiabilité des données, il a été choisi de prendre en compte les incidents survenus entre 2002 et 2011.

Sur un échantillon initial de plusieurs dizaines de milliers d'événements, après harmonisation et tri des incidents collectés, 24 483 événements ont été retenus dans l'échantillon statistique.

Leur répartition en pannes, accidents et incendies est présentée dans le tableau 2.

Nombre d'événements retenus		
Pannes	Accidents	Incendies
19 467	4 839	177
24 483		

Tableau 2 : Détail du nombre d'événements de l'échantillon statistique

Comme explicité en annexe au chapitre 7, selon les ouvrages, certaines périodes ont été exclues pour le calcul des taux d'événements, afin de pouvoir s'appuyer sur des données aussi fiables que possible. Le trafic (véh.km) utilisé pour le calcul des taux peut donc différer d'un type d'événements à l'autre.

LES PANNES EN TUNNEL

Tous les résultats ont été établis sur la base de l'échantillon statistique constitué (cf. 1.4).

2.1 TAUX DE PANNES

Le taux de pannes en tunnel résultant de l'étude est de 279 pannes/10⁸ véh.km. Il découle de l'application des formules explicitées en annexe 8.1.

Le tableau 3 donne des précisions sur les données utilisées pour le calcul et rappelle le périmètre de l'échantillon statistique.

Nombre d'événements	Trafic [10 ⁸ véh.km]	Taux (pannes/[10 ⁸ .véh.km])
19 497	69,82	279

Tableau 3 : Taux de pannes en tunnel routier et données utilisées pour le calcul

2.2 PARAMÈTRES INFLUENÇANT LE TAUX DE PANNES

Ce chapitre présente les paramètres dont l'influence s'est avérée significative sur le taux de pannes au regard des données collectées et des analyses statistiques conduites. Seuls ont été retenus les paramètres identifiés par les régressions multiples, c'est-à-dire les paramètres qui présentent une influence indépendamment des autres. Lorsqu'un tel paramètre émerge, il est systématiquement assorti d'un taux d'incertitude (cf. 1.3).

2.2.1 Urbain/non-urbain

Le caractère urbain est associé à un taux de pannes plus élevé avec un taux d'incertitude de 1 % ce qui traduit une influence très significative.

Ce résultat peut s'expliquer par le fait que le milieu urbain est davantage propice à des changements brutaux de vitesse, des arrêts fréquents et des freinages brusques. Or ces manœuvres sollicitent de façon plus intensive les pièces mécaniques des véhicules, conduisant ainsi à des pannes plus fréquentes.

L'influence des caractères urbain et non urbain est quantifiée dans le tableau 4 qui indique les facteurs multiplicatifs à appliquer au taux moyen du tableau 3.

Type de tunnels	Facteur multiplicatif du taux de pannes
Urbain	1,1
Non urbain	0,5

Tableau 4 : Quantification de l'influence du caractère urbain sur le taux de pannes

2.2.2 Type de véhicules

Le taux de poids lourds dans le trafic a une influence sur le taux général de pannes avec un taux d'incertitude de 1 % ce qui traduit une influence très significative. Lorsque le taux de poids lourds dans le trafic augmente le taux de pannes général est plus élevé.

Ce résultat peut s'expliquer par le fait que le taux de pannes des poids lourds est généralement plus élevé que le taux de pannes des véhicules légers. En effet, en comparaison des véhicules légers, les poids lourds sont nettement plus lourds et leurs trajets réguliers sont beaucoup plus longs. Les pièces mécaniques sont donc soumises à des contraintes plus importantes. De plus, si les exigences en matière d'entretien et de maintenance sont plus élevées, elles peuvent ne pas toujours être parfaitement respectées.

Il existe un rapport d'environ 1,4 entre les taux de pannes des poids lourds et des véhicules légers qui résultent de l'échantillon statistique. Ces taux sont rappelés dans le tableau 5.

Taux de pannes (pannes/[10 ⁸ véh.km])		
Tous véhicules	Véhicules légers (VL)	Poids lourds (PL)
279	268	390

Tableau 5 : Taux de pannes par types de véhicules issus de l'échantillon statistique

2.2.3 Déclivité du tunnel

La déclivité du tunnel a une influence sur le taux de pannes avec un taux d'incertitude de 1 % ce qui traduit une influence très significative.

	Déclivité du tunnel	Facteur multiplicatif du taux de pannes
Pente	- 5 %	0,6
	- 4 %	0,7
	- 3 %	0,7
	- 2 %	0,8
	- 1 %	0,9
Rampe	0 %	1
	1 %	1,3
	2 %	1,7
	3 %	2,1
	4 %	2,7
	5 %	3,5

Tableau 6 : Quantification de l'influence de la déclivité du tunnel sur le taux de pannes

Le taux de pannes est plus élevé lorsque la rampe est plus forte et plus faible lorsque la pente est plus importante⁵.

Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les pièces mécaniques, notamment celles du moteur, sont davantage sollicitées en cas de rampe.

Cette influence est quantifiée dans le tableau 6 et représentée dans la figure 1 :

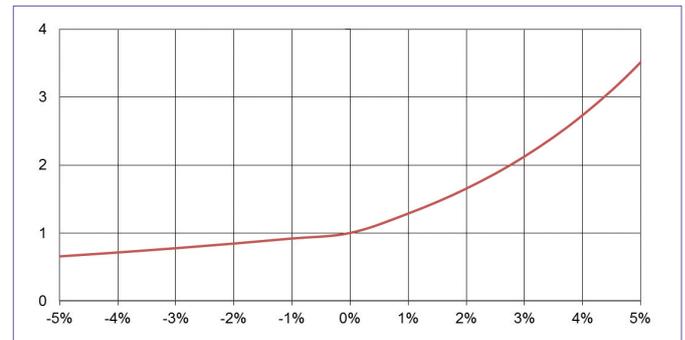


Figure 1 : Évolution du taux de pannes en fonction de la déclivité du tunnel

2.3 COMPARAISON AVEC LES TAUX DE PANNES À L'AIR LIBRE

Seules des données relatives aux pannes sur le réseau autoroutier à l'air libre ont pu être exploitées.

L'ASFA (Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes) publie chaque année un document présentant les chiffres clefs de l'activité des sociétés d'autoroutes. Sur la base de ces rapports annuels, il a été possible d'établir des taux moyens de pannes sur le réseau autoroutier français de 2008 à 2011. Ces taux intègrent les données relatives aux tunnels de ce réseau mais le linéaire de tunnels étant très faible vis-à-vis du linéaire à l'air libre, ces taux peuvent être considérés comme correspondant au seul linéaire à l'air libre.

Les taux de pannes du réseau autoroutier français et ceux relatifs aux tunnels sont présentés dans le tableau 7.

	Taux de pannes moyens (pannes/[10 ⁸ véh.km])	
	Tunnel (2002-2011)	Air libre (autoroutes, 2008-2011)
PL	390	323
VL	268	419
Global	279	405

Tableau 7 : Taux de pannes moyens en tunnel et à l'air libre (autoroutes)

Afin de ne pas introduire de confusion dans la lecture du document, les taux en tunnels indiqués dans le tableau 7 sont ceux présentés au chapitre 2.1 dans le tableau 5 et établis sur la période 2002-2011. Les taux en tunnels calculés sur la seule période 2008-2011 diffèrent peu et sont les suivants : poids lourds : 395 ; véhicules légers : 262 ; Global : 273. Ils sont utilisés dans la figure 2.

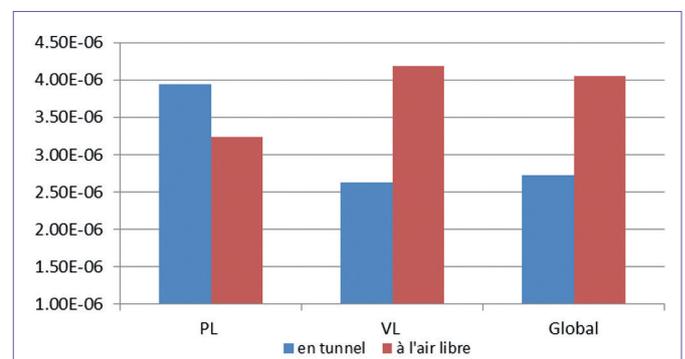


Figure 2 : Taux de pannes moyens sur la période 2008-2011 en tunnel et à l'air libre (autoroutes)

Les taux de pannes du trafic global et des véhicules légers sont plus faibles en tunnel que sur le réseau autoroutier à l'air libre. Cette différence peut s'expliquer par le fait qu'un usager cherchera à sortir et s'arrêter en dehors du tunnel dans la mesure du possible. Il s'agit d'ailleurs là d'une consigne générale applicable à la quasi-totalité des ouvrages et qui est rappelée dans le cadre des formations à la conduite.

Le taux de pannes des poids lourds est par contre plus élevé en tunnel que sur le réseau autoroutier à l'air libre. Cette différence est faible pour cet ordre de grandeur (écart de 72 pannes/10⁸ véh.km soit environ 19 %). Elle peut s'expliquer par la présence de nombreux tunnels dans des régions montagneuses comprenant des routes pentues qui sollicitent fortement les mécaniques.

5. Cf. 5 pour la définition de rampe et de pente.

LES ACCIDENTS EN TUNNEL

Ce chapitre traite d'abord de l'ensemble des accidents (corporels et matériels), puis dans le § 3.3 spécifiquement des accidents corporels. Tous les résultats ont été établis sur la base de l'échantillon statistique constitué (cf. 1.4).

3.1 TAUX D'ACCIDENTS EN TUNNEL

Le taux d'accidents en tunnel est de 41 accidents/10⁸ véh.km. Il résulte de l'application des formules explicitées en annexe 8.1.

Le tableau 8 donne des précisions sur les données utilisées pour le calcul et rappelle le périmètre de l'échantillon statistique.

Nombre d'événements	Trafic ⁶ [10 ⁸ véh.km]	Taux (accidents/ [10 ⁸ .véh.km])
4 839	116,72	41

Tableau 8 : Taux d'accidents en tunnel routier et données utilisées pour le calcul

3.2 PARAMÈTRES INFLUENÇANT LE TAUX D'ACCIDENTS

Ce chapitre présente les paramètres dont l'influence s'est avérée significative sur le taux d'accidents au regard des données collectées et des analyses conduites. Comme pour les pannes, seuls ont été retenus les paramètres identifiés par les régressions multiples. Pour rappel, ces paramètres sont systématiquement assortis d'un taux d'incertitude (cf. 1.3).

3.2.1 Unidirectionnel/bidirectionnel

Le caractère unidirectionnel est associé à un taux d'accidents en tunnel plus élevé avec un taux d'incertitude de 1 % ce qui traduit une influence très significative.

Ce résultat apparemment paradoxal peut s'expliquer d'une part par le nombre de voies dans les ouvrages, d'autre part par le comportement des usagers :

- **le nombre de voies** : lorsqu'il y a plus d'une voie par sens en tunnel, les manœuvres de dépassement sont généralement autorisées, au moins pour les véhicules légers. Ces dépassements peuvent occasionner des collisions entre véhicules. Or, à de rares exceptions près, les tunnels unidirectionnels français comprennent plus d'une voie par sens de circulation tandis que les tunnels bidirectionnels ne disposent que d'une seule voie de circulation par sens. C'était notamment le cas des ouvrages de l'échantillon statistique. Dans les tunnels bidirectionnels, il y a certes un risque particulier de choc frontal entre véhicules de sens opposés, mais la fréquence de ces événements dans les tunnels bidirectionnels est extrêmement

rare (par exemple en 2017, 58 accidents corporels ont eu lieu dans les 94 tunnels du réseau routier national, mais il n'y a eu que 2 chocs frontaux entre véhicules dans les tunnels bidirectionnels). L'influence du nombre de voies sur le taux d'accidents a pu être vérifiée par les régressions multiples ;

- **le comportement des usagers** : dans le domaine de la sécurité routière, il a été observé en de nombreuses occasions que des endroits perçus comme inconfortables voire dangereux par l'automobiliste présentaient un taux d'accidents plus faible. Les analyses conduites à ce sujet ont montré qu'en de tels lieux, le sentiment d'insécurité incitait l'utilisateur à adopter un comportement prudent propre à limiter les accidents (meilleur respect des limitations de vitesse et/ou de l'interdistance et/ou de la signalisation, etc.). Les tunnels bidirectionnels sont souvent perçus comme inconfortables, voire potentiellement plus dangereux par l'automobiliste qui doit circuler sur une voie entre un piédroit et des véhicules transitant en sens inverse dont des poids lourds.

Il existe un rapport d'environ 1,8 entre les taux d'accidents des tunnels unidirectionnels et ceux des tunnels bidirectionnels qui résultent de l'échantillon statistique. Ces taux sont indiqués dans le tableau 9.

Taux d'accidents (accidents/[10 ⁸ véh.km])	
Tunnels unidirectionnels	Tunnels bidirectionnels
44	25

Tableau 9 : Taux d'accidents des tunnels unidirectionnels et bidirectionnels issus de l'échantillon statistique

6. Le trafic retenu est différent de celui indiqué pour le taux de pannes. En effet, avant de disposer d'outils modernes de saisie et/ou de surveillance certains exploitants ont privilégié la collecte des incidents jugés les plus préoccupants, à savoir par ordre de priorité décroissant les incendies et les accidents.

3.2.2 Déclivité du tunnel

La déclivité⁷ du tunnel a une influence sur le taux d'accidents avec un taux d'incertitude de 1 %.

Le taux d'accidents est plus élevé lorsque la rampe ou la pente est plus forte.

Ce résultat peut s'expliquer par le fait que :

- le différentiel de vitesse entre véhicules légers et poids lourds peut être plus élevé lorsque la rampe est plus importante ;
- les vitesses peuvent être plus élevées lorsque la pente est plus forte.

Cette influence est quantifiée dans le tableau 10 et représentée dans la figure 3.

Déclivité du tunnel (rampe ou pente)	Facteur multiplicatif du taux d'accidents
0 %	0,9
1 %	1,00
2 %	1,05
3 %	1,15
4 %	1,25
5 %	1,35

Tableau 10 : Quantification de l'influence de la déclivité du tunnel sur le taux d'accidents

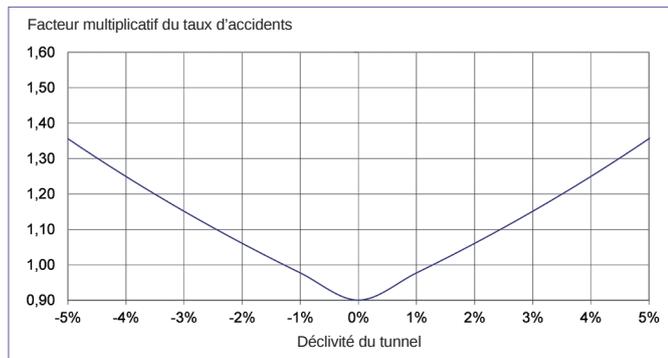


Figure 3 : Évolution du taux d'accidents en fonction de la déclivité du tunnel

3.2.3 Présence d'échangeurs

La présence d'échangeurs à l'intérieur du tunnel ou à l'extérieur proches de celui-ci⁸, a une influence sur le taux d'accidents avec un taux d'incertitude de 5 %.

Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'un échangeur engendre des changements de voies en amont et en aval de sa position ainsi que des manœuvres d'insertion et/ou de sortie de véhicules. Or, ces manœuvres sont susceptibles d'engendrer des chocs latéraux et/ou arrières entre véhicules, ainsi qu'avec les équipements ou la structure de l'ouvrage.

L'influence de la présence d'échangeurs sur le taux d'accidents en tunnel est quantifiée dans le tableau 11.

Présence d'échangeurs	Facteur multiplicatif du taux d'accidents
Pas d'échangeur	1
À moins de 500 m du tunnel	1,2
En tunnel	1,4

Tableau 11 : Quantification de l'influence de la présence d'échangeurs sur le taux d'accidents

7. Cf. 1.3 pour la définition de rampe et de pente.

8. L'influence des échangeurs à l'extérieur du tunnel a été évaluée jusqu'à 500 m des têtes.

3.3 LES ACCIDENTS CORPORELS

3.3.1 Taux d'accidents corporels

Le taux d'accidents corporels en tunnel routier est de **8 accidents/10⁸ véh.km**.

Dans la mesure où les accidents corporels n'ont pas été systématiquement distingués des autres accidents, l'analyse statistique n'a porté que sur un extrait de la base pour laquelle ces accidents étaient documentés. Ce résultat a permis de constater que sur la période considérée (2002-2011), environ 20 % de l'ensemble des accidents étaient des accidents corporels.

3.3.2 Paramètres influençant le taux d'accidents corporels

Comme pour l'ensemble des accidents, seuls ont été retenus les paramètres identifiés par les régressions multiples. Pour rappel, ces paramètres sont systématiquement assortis d'un taux d'incertitude (cf. 1.3).

Le caractère unidirectionnel/bidirectionnel et la pente du tunnel sont des paramètres d'influence du taux de survenance des accidents corporels comme c'était le cas pour l'ensemble des accidents. Le taux de poids lourds dans le trafic est par contre un paramètre d'influence spécifique du taux d'accidents corporels. Ces trois paramètres sont détaillés ci-après.

Il est intéressant de remarquer que la présence d'échangeurs en tunnel ou à proximité est un paramètre d'influence du taux de survenance de l'ensemble des accidents, mais pas du taux de survenance des accidents corporels.

Unidirectionnel/bidirectionnel

Comme pour l'ensemble des accidents, le caractère unidirectionnel est associé à un taux d'accidents corporels plus élevé avec un taux d'incertitude de 1 % ce qui traduit une influence très significative. Il peut s'expliquer de la même manière par le nombre de voies dans les ouvrages, et par le comportement des usagers (cf. 3.2.1).

Il existe également un rapport d'environ 1,8 entre les taux d'accidents corporels dans les tunnels unidirectionnels et ceux concernant les tunnels bidirectionnels qui résultent de l'échantillon statistique.

Déclivité du tunnel

Comme pour l'ensemble des accidents, la déclivité⁹ du tunnel a une influence sur le taux d'accidents corporels avec un taux d'incertitude de 1 % ce qui traduit une influence significative.

Le taux d'accidents corporels est également plus élevé lorsque la valeur absolue de la déclivité est plus forte et ce avec les mêmes facteurs explicatifs : différentiel de vitesse entre véhicules légers et poids lourds dans le cas de la rampe ; vitesse dans le cas de la pente (cf. 3.2.2).

L'influence quantitative de la déclivité sur le taux d'accidents corporels ne diffère que légèrement du cas de l'ensemble des accidents (cf. tableau 10), et ne concerne que les rampes de 0 % et 2 % (facteurs multiplicatifs respectivement de 0,92 et 1,08).

Type de véhicules

Le taux de poids lourds dans le trafic a une influence sur le taux général d'accidents corporels avec un taux d'incertitude de 5 %. Lorsque le taux de poids lourds dans le trafic augmente le taux d'accidents corporels est plus élevé. Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'un accident impliquant un poids lourd est généralement plus grave qu'un choc n'impliquant pas ce type de véhicules, l'énergie mécanique d'un poids lourd étant bien plus importante que celle d'un véhicule léger.

Cette influence est quantifiée dans le tableau 12.

Taux de PL	Facteur multiplicatif du taux d'accidents corporels
0 %	1,00
1 %	1,02
2 %	1,05
5 %	1,12

Tableau 12 : Quantification de l'influence du taux de poids lourds sur le taux d'accidents corporels

3.3.3 Gravité

La quantification de la gravité des accidents corporels sur la période 2002-2011 dans les tunnels routiers français est présentée dans le tableau 13.

	Taux (nombre/[10 ⁸ véh.km])	Nombre/accident corporel
Blessés	10,4	1,3
Tués	0,3	0,04

Tableau 13 : Quantification de la gravité en tunnel sur la période 2002-2011

Les blessés sont classés en deux catégories : blessés hospitalisés et blessés non hospitalisés (cf. 1.3).

Dans les 14 PC où la distinction a été faite, la part des blessés hospitalisés est d'environ 8 %.

9. Cf. 5 pour la définition de rampe et de pente.

10. En tunnel, le détail de la gravité n'est pas toujours précisé pour les accidents corporels. C'est très probablement la raison pour laquelle le taux de blessés est inférieur au taux d'accidents corporels.

3.3.4 Comparaison avec l'air libre

L'ONISR (Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière) publie chaque année le bilan annuel de la sécurité routière en France. Sur la base de ces rapports, il a été possible d'établir des taux d'accidents, de blessés et de tués sur l'ensemble du réseau routier français métropolitain de 2007 à 2011. Ces taux intègrent les données relatives aux tunnels du réseau. Le linéaire de tunnel étant très faible vis-à-vis du linéaire à l'air libre, ces taux peuvent être considérés comme correspondant au seul linéaire à l'air libre.

Les taux d'accidents corporels, de blessés et de tués du réseau routier français à l'air libre, ainsi que ceux relatifs aux tunnels routiers, sont présentés dans le tableau 14.

	Accidents corporels/ [10 ⁸ véh.km]	Blessés ¹⁰ / [10 ⁸ véh.km]	Tués/ [10 ⁸ véh.km]
Tunnel 2002-2011	8	10,4	0,3
Air libre 2007-2011	13,1	16,4	0,76

Tableau 14 : Taux d'accidents corporels, de blessés et de tués en tunnel et à l'air libre

Afin de ne pas introduire de confusion dans la lecture du document, les taux en tunnels indiqués dans le tableau 14 sont ceux présentés aux chapitres 3.3.1 et 3.3.3 et établis sur la période 2002-2011. Les taux en tunnels calculés sur la seule période 2007-2011 diffèrent mais ne changent pas les résultats de la comparaison avec l'air libre. Ils sont les suivants : taux d'accidents corporels : 8,84 ; taux de blessés : 6,86 ; taux de tués : 0,21. Ils sont utilisés dans la figure 4.

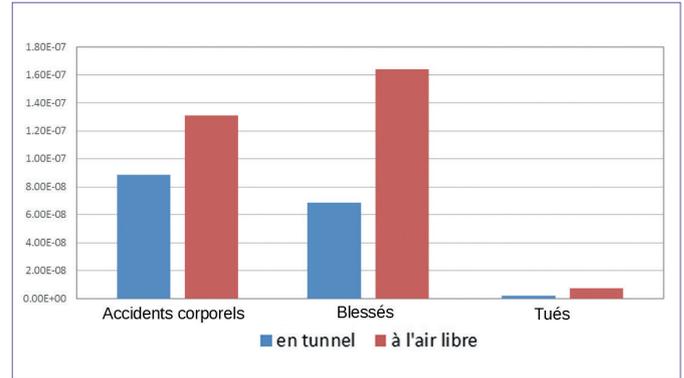


Figure 4 : Taux d'accidents corporels, de blessés et de tués sur la période 2007-2011 en tunnel et à l'air libre

Le tableau 14 et la figure 4 permettent de constater que les taux d'accidents corporels et de victimes sont plus faibles en tunnel qu'à l'air libre. En effet, le taux d'accidents corporels à l'air libre apparaît 1,5 fois supérieur au taux d'accidents corporels en tunnel. Les taux de tués et de blessés sont respectivement 3,7 fois et 2,4 fois plus élevés à l'air libre qu'en tunnel.

Ce constat peut s'expliquer par le fait que les sections à l'air libre peuvent comporter un certain nombre de facteurs accidentogènes inexistants ou rares en tunnel : intersections, courbes prononcées et/ou successives, bretelles d'accès ou de sortie, sections à fortes vitesses, etc.

D'autre part, un autre facteur explicatif a trait au comportement des usagers, probablement plus vigilants en tunnel qu'à l'air libre (en raison de l'espace confiné).

LES INCENDIES EN TUNNEL

Tous les résultats ont été établis sur la base de l'échantillon statistique constitué (cf. 1.4).

4.1 TAUX D'INCENDIES EN TUNNEL

Le taux d'incendies résultant de l'étude est de 1,1 incendies/10⁸ véh.km. Il découle de l'application des formules explicitées en annexe 8.1.

Le tableau 15 donne des précisions sur les données utilisées pour le calcul et rappelle le périmètre de l'échantillon statistique.

Nombre d'événements	Trafic ¹¹ [10 ⁸ véh.km]	Taux (incendies/ [10 ⁸ .véh.km])
177	167,6	1,1

Tableau 15 : Taux d'incendies en tunnel routier et données utilisées pour le calcul

4.2 PARAMÈTRES INFLUENÇANT LE TAUX D'INCENDIES

Ce chapitre présente les paramètres dont l'influence s'est avérée significative sur le taux d'incendies au regard des données collectées. Comme pour les pannes et les accidents, seuls ont été retenus les paramètres identifiés par les régressions multiples. Pour rappel, ces paramètres sont systématiquement assortis d'un taux d'incertitude (cf. 1.3).

4.2.1 Type de véhicules

Le taux de poids lourds dans le trafic a une influence sur le taux général d'incendie avec un taux d'incertitude de 5,1 %. Lorsque le taux de poids lourds dans le trafic augmente le taux général d'incendies est plus élevé.

Ce résultat peut s'expliquer par le fait que le taux d'incendies de poids lourds est plus élevé que le taux d'incendies de véhicules légers. En comparaison des véhicules légers, les poids lourds sollicitent davantage les pièces mécaniques et leurs trajets réguliers sont beaucoup plus longs. Pour ces trajets plus longs, des appareils électriques audiovisuels ou ménagers sont fréquemment installés dans la cabine et constituent des sources potentielles d'incendie. Toutes ces particularités sont des facteurs possibles d'inflammation spontanée des poids lourds ce qui engendre un taux d'incendies plus élevé.

Sur la base de l'échantillon statistique, il existe un rapport d'environ 3,3 entre le taux d'incendies des poids lourds et celui des véhicules légers. Ces taux sont rappelés dans le tableau 16.

Taux d'incendies (incendies/[10 ⁸ véh.km])	
Véhicules légers (VL)	Poids lourds (PL)
0,9	2,9

Tableau 16 : Taux d'incendies des véhicules légers et des poids lourds issus de l'échantillon statistique

4.2.2 Déclivité du tunnel

La rampe¹² du tunnel a une influence sur le taux d'incendies avec un taux d'incertitude de 5 %.

Le taux d'incendie est plus élevé lorsque la rampe est plus forte. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les pièces mécaniques, notamment celles du moteur, sont davantage sollicitées en cas de rampe, donc susceptibles de monter en température ou de casser ce qui peut provoquer un début d'incendie.

11. Le trafic retenu est différent de celui indiqué pour le taux de pannes. En effet, avant de disposer d'outils modernes de saisie et/ou de surveillance certains exploitants ont privilégié la collecte des incidents jugés les plus préoccupants, à savoir par ordre de priorité les incendies et les accidents.

12. Cf. 1.3 pour la définition de rampe et de pente.

Cette influence est quantifiée dans le tableau 17 et représentée dans la figure 5.

Déclivité du tunnel (rampe ou pente)	Facteur multiplicatif du taux d'incendies
≤ 0 %	0,9
1 %	1,05
2 %	1,2
3 %	1,45
4 %	1,65
5 %	1,95

Tableau 17 : Quantification de l'influence de la déclivité du tunnel sur le taux d'incendies

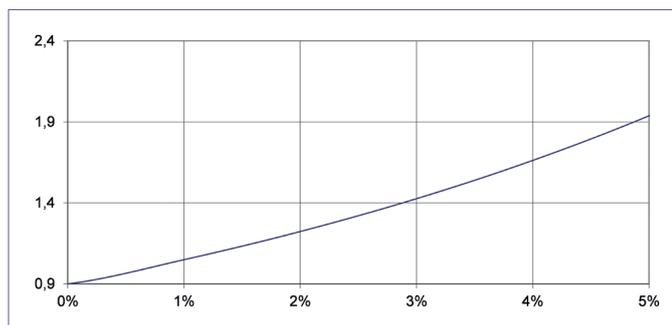


Figure 5 : Évolution du taux d'incendies en fonction de la déclivité du tunnel

4.2.3 Déclivité des voies d'accès

La déclivité des voies d'accès au tunnel a une influence sur le taux d'incendies avec un taux d'incertitude de 6 %.

Lorsque l'itinéraire d'accès au tunnel comporte, sur une longue distance, une ou plusieurs sections proches dont la déclivité (rampe ou pente) est particulièrement importante, le taux d'incendies est plus élevé.

Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'un tel itinéraire sollicite davantage les pièces mécaniques et les freins qui sont donc susceptibles de monter en température ou de casser ce qui peut provoquer un début d'incendie.

Le taux d'incendie des tunnels comportant des rampes d'accès au dénivelé significatif sur une longue distance est environ deux fois plus élevé qu'en l'absence de telles rampes.

CONCLUSION

Les études réalisées ont permis d'actualiser les taux de survenances des pannes, accidents et incendies et d'identifier leurs paramètres d'influence grâce à des régressions multiples.

Ces études sont basées sur les événements survenus entre 2002 et 2011 dans 96 tunnels représentant plus de 70 % du linéaire des tunnels français de plus de 300 m.

Les **taux de survenances moyens des pannes, accidents et incendies** en tunnel routier calculés sur la base de ces événements sont présentés dans le tableau 18.

Pannes/ [10 ⁸ véh.km]	Ensemble des accidents/ [10 ⁸ véh.km]	Accidents corporels/ [10 ⁸ véh.km]	Incendies/ [10 ⁸ véh.km]
279	41	8	1,1

Tableau 18 : Taux de pannes, d'accidents et d'incendies en tunnel routier

La **gravité des accidents corporels** est quantifiée dans le tableau 19.

Blessés/ [10 ⁸ véh.km]	Tués/ [10 ⁸ véh.km]
10,4	0,3

Tableau 19 : Quantification de la gravité en tunnel

Seuls ont été retenus **les paramètres** ayant une influence avérée sur les événements (taux d'incertitude inférieur ou égal à 6%). Ils sont présentés ci-après :

Pannes

Le **caractère urbain** d'un tunnel est associé à un taux de pannes plus élevé. Le taux de pannes général (cf. tableau 18) peut ainsi être multiplié par environ 1,1 pour les ouvrages urbains et environ 0,5 pour les ouvrages non urbains.

Le taux de **poids lourds** dans le trafic a une influence sur le taux général de pannes : lorsque le taux de poids lourds dans le trafic augmente le taux de pannes général est plus élevé. Le taux de pannes des poids lourds est environ 1,4 fois plus élevé que le taux de pannes des véhicules légers.

Le **déclivité¹³ du tunnel** a une influence sur le taux de pannes. Le taux de pannes est plus élevé lorsque la rampe est plus forte. Il est plus faible lorsque la pente est plus importante. Par exemple, le taux de pannes d'un ouvrage présentant une déclivité de 3 % est environ 2 fois plus élevé que si la déclivité est nulle.

Accidents

Le **caractère unidirectionnel** est associé à un taux d'accidents plus élevé. Le taux d'accidents des tunnels unidirectionnels est environ 2 fois plus élevé que celui des tunnels bidirectionnels. Le caractère unidirectionnel est aussi associé à un taux d'accidents corporels plus élevé. Ces résultats s'expliquent principalement par le nombre de voies et les comportements des usagers.

Le **déclivité du tunnel** a une influence sur le taux d'accidents. Le taux d'accidents est plus élevé lorsque la valeur absolue de la déclivité est plus forte. Par exemple, le taux d'accidents d'un ouvrage avec une déclivité de 3 % est environ 1,3 fois plus élevé que si la déclivité est nulle. La déclivité du tunnel a aussi une influence sur le taux d'accidents corporels.

La **présence d'échangeur** à l'intérieur du tunnel ou à l'extérieur à moins de 500 m de celui-ci a une influence sur le taux d'accidents. Le taux d'accidents d'un tunnel comportant des échangeurs est environ 1,4 fois plus élevé que s'il n'y a pas d'échangeur. La présence d'échangeur n'a en revanche pas été identifiée comme un facteur d'influence du taux d'accidents corporels.

Le taux de **poids lourds** dans le trafic a une influence sur le taux général d'**accidents corporels**. Lorsque le taux de poids lourds dans le trafic augmente le taux d'accidents corporels est plus élevé. Par exemple, le taux d'accidents corporels d'un tunnel avec un taux de poids lourds de 5 % est environ 1,12 fois plus élevé qu'en l'absence de poids lourds.

Incendies

Le taux de **poids lourds** dans le trafic a une influence sur le taux général d'incendies avec un taux d'incertitude de 5,1 %. Lorsque le taux de poids lourds dans le trafic augmente le taux général d'incendies est plus élevé. Le taux d'incendies des poids lourds est environ 3,2 fois plus élevé que le taux d'incendies des véhicules légers.

13. Cf. 1.3 pour la définition de rampe et de pente.

La rampe¹⁴ du tunnel a une influence sur le taux d'incendies. Le taux d'incendies est plus élevé lorsque la rampe est plus forte. Le taux d'incendies d'un ouvrage présentant une déclivité de 3 % est environ 1,6 fois plus élevé que si la déclivité est nulle.

La déclivité des voies d'accès au tunnel a une influence sur le taux d'incendies. Lorsque l'itinéraire d'accès au tunnel comporte, sur une longue distance, une ou plusieurs sections proches dont la déclivité (montante ou descendante) est particulièrement importante, le taux d'incendies est plus élevé. Le taux d'incendies des tunnels comportant des voies d'accès à la déclivité significative sur une longue distance est environ deux fois plus élevé qu'en l'absence de telles voies d'accès.

Plus de détails, notamment concernant les facteurs explicatifs de ces paramètres d'influence et leur taux d'incertitude, sont donnés aux chapitres 2.2 (pannes), 3.2 (accidents), 3.3.2 (accidents corporels) et 4.2 (incendies).

Comparaison avec l'air libre

Dans la mesure de la disponibilité des données, **une comparaison des statistiques en tunnel et à l'air libre** a pu être conduite. Ses principaux enseignements sont présentés ci-dessous :

- Les taux de pannes du trafic global et des véhicules légers sont plus faibles en tunnel que sur le réseau autoroutier à l'air libre mais c'est le contraire pour le taux de pannes des poids lourds (cf. 2.3).

- Les taux d'accidents corporels et de victimes sont plus faibles en tunnel qu'à l'air libre (cf. 3.3.4).

Traitement des biais

Comme dans toute étude faisant intervenir des données collectées sur le terrain, **des biais** sont susceptibles d'impacter les résultats malgré l'utilisation de méthodes sophistiquées. En premier lieu, les événements ne sont pas tous recensés de la même manière selon les différents exploitants, notamment les pannes. Les données collectées, leur niveau de détail et leur définition peuvent être hétérogènes d'un exploitant à l'autre, par exemple en fonction des moyens humains et matériels dédiés à cette tâche. Le processus de relecture et de vérification peut également varier. Au cours de la période prise en compte dans les études (2002-2011), des changements ont pu intervenir en matière d'équipements (vidéo notamment) et/ou d'organisation de l'exploitation ou de personnel, qui peuvent avoir un impact sur la collecte des données et leur traitement. Enfin, comme dans toute activité humaine, le processus de collecte et de vérification a pu comporter des erreurs.

Il convient toutefois de noter que ces biais sont plus limités pour ce qui concerne les événements les plus graves, car ces événements font l'objet d'une attention toute particulière chez les exploitants. En outre, un processus de vérification et de recoupement des informations a permis de limiter l'impact de ces biais dans les différentes études menées.

14. Cf. 5 pour la définition de rampe et de pente.

6 ANNEXE 1 MISE EN PERSPECTIVE DES NOUVEAUX TAUX EN REGARD DES RÉFÉRENCES PRÉEXISTANTES

6.1 TAUX DE PANNES, D'ACCIDENTS ET D'INCENDIES DU RAPPORT DE 1998

Les taux de pannes, d'accidents et d'incendies du rapport de 1998 ainsi que les nouveaux taux du présent document sont rappelés dans le tableau 20.

Taux	Pannes/ [10 ⁸ véh.km]	Accidents/ [10 ⁸ véh.km]	Accidents corporels/ [10 ⁸ véh.km]	Incendies/ [10 ⁸ véh.km]
Rapport 1998	530	70	20	3
Document d'information 2021	279	41	8	1,1

Tableau 20 : Taux de pannes, accidents et incendies du rapport de 1998 et nouveaux taux

Le tableau 20 montre que chaque taux est inférieur à celui correspondant du rapport de 1998. Cette diminution est cohérente avec ce qui est observé à l'air libre. Plusieurs facteurs explicatifs pourraient être avancés : efforts fournis par les maîtres d'ouvrage, les exploitants de tunnel et les autres parties prenantes en matière de sécurité de leur ouvrage, amélioration continue de la sécurité des véhicules et de leur fiabilité, meilleure information et sensibilisation des usagers tant en termes de sécurité routière générale que de comportements spécifiques à adopter en tunnel, renforcement des contrôles-sanctions.

Toutefois, il y a lieu de demeurer très prudent en la matière et il est recommandé de ne pas tirer de conclusions de cette comparaison. En effet, que ce soit en termes de nombre d'ouvrages ou de période de survenue des incidents, les nouveaux taux ont une base statistique bien plus représentative et robuste que ceux de 1998, comme précisé ci-après.

Les nouveaux taux reposent sur un échantillon de 96 ouvrages et une période d'environ 10 ans (cf. chapitre 1.4). Les taux du rapport de 1998 sont issus d'un échantillon de 38 ouvrages (avec un nombre de tunnels par type d'ouvrages très hétérogène : cf. tableau 21). La période prise en compte était très variable d'un ouvrage à l'autre, de 2 ans pour certains tunnels à 10 ans pour d'autres. Pour 78 % des tunnels sur autoroutes de liaisons concédées, la période était de 5 ans.

Type de tunnels	Nombre de tunnels
Tous	38
Grands tunnels à trafic bidirectionnel	2
Tunnels sur autoroutes de liaisons concédées	23
Tunnels urbains et périurbains	11
Tunnels urbains à trafic bidirectionnel	2

Tableau 21 : Nombre d'ouvrages par catégories de l'IT 2000

6.2 TAUX D'INCENDIE DU FASCICULE 4 DU GUIDE DES DOSSIERS DE SÉCURITÉ

Le fascicule 4 du guide des dossiers de sécurité explique le rôle de l'étude spécifique des dangers dans le dossier de sécurité et la méthodologie recommandée. Des recommandations pratiques et des valeurs standardisées de certains paramètres sont données en annexe de ce fascicule pour les personnes chargées du pilotage ou de la réalisation de ce type d'études. Des taux d'incendies font partie de ces valeurs. Ceux relatifs aux VL et aux PL¹⁵ sont rappelés (sauf cas « hors norme ») dans le tableau 22, ainsi que les nouveaux taux.

	Fascicule 4 (incendies/ [10 ⁸ véh.km])	Document d'information 2021 (incendies/[10 ⁸ véh.km])
VL	2	0,9
PL et autocars	[1,5 - 4,5]	2,9
<i>Dont non maîtrisés</i>	[0,5 - 1,5]	-

Tableau 22 : Taux d'incendie du fascicule 4 et nouveaux taux d'incendies

15. Le fascicule 4 donne également des taux relatifs aux transports de marchandises dangereuses mais, par manque de données, ce type de marchandises n'a pu être investigué dans le cadre de l'étude qui a permis d'établir les nouveaux taux.

Le tableau 22 montre que le nouveau taux d'incendies des véhicules légers est inférieur à celui du fascicule 4. Le fascicule 4 ayant été publié en 2003, cette diminution s'explique probablement par les progrès réalisés depuis en matière de fiabilité et d'entretien des véhicules, l'essentiel des incendies ayant en effet pour origine un problème mécanique.

Ces progrès concernent aussi les poids lourds. Mais l'augmentation du tonnage transporté et l'allongement des trajets sont de nature à augmenter le risque d'incendies de ce type de véhicules. En effet, le chapitre 4.2.1 a notamment montré que le taux de poids lourds dans le trafic a une influence sur le taux général d'incendies. Lorsque le taux de poids lourds dans le trafic augmente, le taux général d'incendies est plus élevé

en raison d'un poids plus élevé et de trajets plus longs que les véhicules légers. C'est probablement pourquoi le nouveau taux reste dans la plage de valeurs du fascicule 4 tout en étant légèrement plus proche de la valeur minimale.

Les nouveaux taux peuvent donc être utilisés sauf pour les PL si des éléments spécifiques locaux conduisent à retenir une valeur plus élevée, comprise dans la plage du fascicule 4.

Si, en l'absence de statistiques locales suffisamment robustes, les taux d'incendies de référence du présent document sont utilisés, alors les paramètres d'influence (rampe du tunnel, déclivité des voies d'accès - cf. 4.2) sont également à employer pour affiner les résultats.

ANNEXE 2

DÉMARCHE DE COLLECTE ET CONSOLIDATION DES DONNÉES

Diverses sources ont été utilisées, dépendant de l'exploitant, du PC gérant le tunnel ou du tunnel lui-même.

Les informations relatives aux événements ont été extraites de :

- mains courantes papier des opérateurs de surveillance des PC ;
- bases de données informatiques recensant les événements survenus ;
- bilans d'exploitation trimestriels, semestriels ou annuels ;
- bilan des fermetures ;
- bilan des interventions en tunnel ;
- pièce « Liste des incidents et accidents significatifs » des Dossiers de Sécurité ;
- fiches saisies par l'exploitant sur le site du CETU dédié au retour d'expérience centralisé ;
- articles de presse pour les événements les plus marquants.

Les informations relatives aux caractéristiques des tunnels ont été fournies par les exploitants ou extraites des dossiers de sécurité ou d'autres documents fournis.

Une fois les données collectées pour chaque exploitant, l'ensemble de ces dernières a été exporté dans 3 bases de données distinctes par types d'événements (pannes, accidents, incendies), au niveau national.

Certaines données n'ont pas été intégrées aux calculs de taux en raison des trop fortes incertitudes qu'elles comportaient.

En outre, afin de garantir la fiabilité des taux calculés, une analyse critique a permis de filtrer les données. Notamment, les opérations suivantes ont été réalisées successivement :

- recherche de doublons ;
- requalification de certains événements ;
- recoupement avec les fiches transmises au CETU ;
- pour les événements les plus critiques (incendies, accidents corporels les plus graves), demande de compléments d'informations auprès de l'exploitant et recoupement avec l'actualité ;
- exclusion de certaines années présentant de trop grandes disparités avec celles collectées le reste de la période (beaucoup moins d'événements par exemple) sans qu'elles puissent être justifiées. Les années d'exclusion peuvent varier selon le type d'événements et bien entendu selon les ouvrages. Ces années peuvent par exemple correspondre à des périodes où il n'y avait ni vidéo ni détection automatique d'incident.

ANNEXE 3

PRÉCISIONS SUR LES MÉTHODES STATISTIQUES EMPLOYÉES

La présente annexe rend compte des formules et méthodes utilisées par le bureau d'études BG Ingénieurs Conseils assisté de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne dans le cadre de leur étude (cf. 1.2).

8.1 CALCULS DE TAUX D'ÉVÉNEMENTS

Les calculs de taux par année, ci-après appelés « taux annuels », ne prennent en considération que les tunnels et les années retenus (cf. 7). Ainsi, ils ne correspondent pas toujours aux mêmes tunnels (les données de certains tunnels n'ayant pas été retenues pour l'ensemble des années étudiées).

L'objectif étant de calculer un taux pour chaque année, la méthode a consisté à calculer le taux annuel pour chaque type d'événement en prenant en compte tous les tunnels pour lesquels l'année considérée est jugée représentative.

La formule utilisée est donc, pour le type d'événement E et la période A :

$$\frac{\sum_{\text{Tunnels } T} \text{nombre d'événements}_{E,A,T} \times R_{E,A,T}}{\sum_{\text{Tunnels } T} \text{véhicules} \cdot \text{km}_{A,T} \times R_{E,A,T}}$$

avec $R^{E,A,T}$ égal à 1 si les événements de type E survenus lors de la période A dans le tunnel T récoltés sont jugés suffisamment exhaustifs, et 0 sinon. Ce principe de calcul est appliqué quelle que soit la période prise en compte.

8.2 ANALYSES STATISTIQUES APPROFONDIES – RÉGRESSIONS MULTIPLES

Alors que les analyses statistiques simplifiées ne permettent d'isoler qu'un seul paramètre en vue de l'étudier, les analyses statistiques approfondies par régression permettent d'étudier l'influence de plusieurs paramètres en même temps et d'isoler l'influence de chacun de ces derniers.

De telles analyses nécessitent la mise en place d'outils plus complexes et permettent de conforter ou moduler les conclusions des analyses simplifiées. Les paramètres étudiés dans les analyses statistiques approfondies sont les mêmes que ceux étudiés dans les analyses simplifiées, pour les pannes, les accidents et les incendies.

Les sous-chapitres suivants présentent :

- l'objectif des régressions et le choix des modèles statistiques ;
- le choix des paramètres retenus pour ces analyses, par types d'événements ;
- l'évaluation de la significativité des résultats.

Objectif de l'analyse par régressions et choix des modèles

L'objectif de l'analyse par régression consiste à obtenir une formule qui, à partir d'un certain nombre de paramètres propres à un tunnel (durant une certaine période), renvoie une estimation fiable du nombre d'événements survenus (pannes, accidents ou incendies). Cette formule va ainsi permettre

de fournir des indications sur l'influence de chacun de ces paramètres. Cette formule s'appuie sur un modèle statistique.

Il existe plusieurs types de modèles statistiques permettant de simuler la survenance d'événements aléatoires, tels que les pannes, les accidents et les incendies.

Les modèles qui ont été retenus pour répondre à la problématique des événements en tunnels sont les suivantes :

- la régression de Poisson ;
- la régression Quasi-Poisson ;
- la régression Binomiale Négative.

La loi de Poisson est particulièrement adaptée aux événements rares, tels que les événements étudiés par rapport aux nombres de véhicules traversant le tunnel.

Les régressions Quasi-Poisson et Binomiale Négative permettent de modéliser les cas de sur-dispersion, soit le fait que les données varient plus que ne le prédit le modèle simple de Poisson. Cette sur-dispersion a souvent pour cause l'influence d'autres facteurs de second ordre non pris en compte dans le cadre des analyses statistiques. Cette sur-dispersion est observée pour les pannes et les accidents, mais pas pour les incendies, qui sont beaucoup moins nombreux.

La diversité des modèles existants et des outils d'évaluation (tests statistiques) permet d'améliorer et d'évaluer la fiabilité des paramètres estimés.

Chacun de ces modèles fournit des résultats satisfaisants. La démarche générale pour statuer sur la régression la plus pertinente consiste, pour chaque famille d'événement, à :

- réaliser plusieurs régressions sur la base des méthodes présentées ci-dessus ;
- analyser les « résidus » des régressions, qualifiant la qualité du modèle ;
- retenir le modèle le plus pertinent et exploiter ses résultats.

Dans la présentation des résultats des analyses, seul le modèle le plus approprié est présenté. Cependant, tous les modèles appropriés à chaque type d'événement ont été étudiés afin de s'assurer que les résultats présentés étaient les plus corrects possibles (adéquation maximale entre le modèle et les données).

Choix des paramètres retenus

Il n'a pas été possible de prendre en compte dans l'analyse statistique approfondie tous les paramètres qui ont été intégrés à la collecte des données.

En effet, plusieurs cas de figure pouvaient se présenter :

- il y avait trop peu de données collectées concernant ce paramètre, par exemple : niveau de trafic au moment où survient l'événement, cause de l'événement, etc. ;

- il n'existait pas ou très peu de relation de causalité entre le paramètre et la survenance des événements (ex : présence de barrière de fermeture aux têtes vis-à-vis des pannes).

Ce tri a permis de retenir une liste importante de paramètres sur lesquels l'analyse approfondie a pu être menée. Dans certains cas, l'analyse a montré que certains paramètres ne présentaient pas d'influence sur la survenance des événements.

Significativité des résultats de l'analyse statistique approfondie : définition

Dans le cadre des approfondissements statistiques, un résultat est jugé statistiquement significatif lorsqu'il est improbable qu'il puisse être obtenu par le fruit du hasard. Afin de déterminer la significativité d'un résultat, un taux d'incertitude est calculé et il correspond à la probabilité que le résultat obtenu soit le fruit du hasard.

Par exemple, un taux d'incertitude de 5 % signifie que le résultat observé a moins de 5 % de chances d'être le fruit du hasard. Plus le taux d'incertitude est bas, plus le crédit accordé au résultat correspondant est grand.

Un résultat est considéré comme statistiquement significatif dès lors que son taux d'incertitude est inférieur au seuil de 6 %.

CONTRIBUTEURS

Christophe WILLMANN, Marc TESSON, Hélène MONGEOT et Michel DEFFAYET ont participé    l'élaboration de ce document.

Centre d'Études des Tunnels

25 avenue François Mitterrand
69500 BRON - FRANCE
Tél. +33 (0)4 72 14 34 00
Fax. +33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr



**MINISTÈRE
CHARGÉ
DES TRANSPORTS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

