

LE TRAITEMENT DES OBSTACLES LATÉRAUX EN TUNNEL

Démarche de sécurité



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.

*LE TRAITEMENT
DES OBSTACLES LATÉRAUX
EN TUNNEL*

Démarche de sécurité

février 2024

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 LES OBSTACLES LATÉRAUX, UN ÉLÉMENT DE SÉCURITÉ ROUTIÈRE EN TUNNEL	5
1.1 Le contexte	5
1.2 Les contraintes liées aux tunnels	5
2 LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE ET JURIDIQUE	6
2.1 La réglementation française relative au traitement des obstacles latéraux	6
2.2 La responsabilité du maître d'ouvrage	6
3 DÉMARCHE POUR PRENDRE EN COMPTE LA SÉCURITÉ LIÉE AUX OBSTACLES LATÉRAUX	7
3.1 Recensement des obstacles	7
3.1.1 Définition de l'obstacle latéral	7
3.1.2 Les obstacles latéraux présents en tunnel	7
3.1.3 Les éléments à ne pas considérer comme des obstacles latéraux en tunnel	10
3.2 Suppression de certains obstacles	11
3.3 Hiérarchisation du risque associé aux obstacles restants	11
3.4 Le traitement des obstacles restants	12
3.4.1 Cas des changements de section	12
3.4.2 Cas des obstacles constitués par des décrochés dans les piédroits	13
3.4.3 Cas des obstacles en garage	14
4 CONCLUSION	19
5 ANNEXE : MODALITÉS D'APPLICATION DU GUIDE SETRA AUX TUNNELS	20
6 BIBLIOGRAPHIE	32

LES OBSTACLES LATÉRAUX, UN ÉLÉMENT DE SÉCURITÉ ROUTIÈRE EN TUNNEL

1.1 LE CONTEXTE

Pour assurer la sécurité des usagers en tunnel, plusieurs dispositifs sont mis en place et peuvent parfois conduire à la création de points singuliers venant rompre la continuité des piédroits. À l'instar de ce qui se passe sur le réseau routier à l'air libre, certaines de ces singularités formant des obstacles latéraux peuvent constituer un réel danger dans les tunnels routiers et occasionner des accidents.

Même si ce type de collision est très rare en tunnel, l'accident de l'autocar survenu en mars 2012 dans le tunnel de Sierre, situé en Suisse, dans le canton de Valais, en est un exemple. Ce jour-là,

un autocar ramenant des écoliers et leurs accompagnateurs en Belgique après un séjour de ski heurte le piédroit du tunnel, puis le mur de retour en extrémité d'un emplacement d'arrêt d'urgence, appelé garage. Sur les 52 occupants de l'autocar, 28 personnes, dont 22 enfants, sont tuées par la violence du choc frontal.

Suite à cet accident, des investigations ont été menées afin de déterminer si des solutions peuvent être proposées pour améliorer la sécurité routière vis-à-vis des obstacles en tunnel. Elles se sont intéressées prioritairement aux accidents impliquant les véhicules légers et les bus.

1.2 LES CONTRAINTES LIÉES AUX TUNNELS

Les réflexions sur l'amélioration de la sécurité routière, notamment en ce qui concerne le traitement des obstacles latéraux, se sont basées sur la doctrine existante à l'air libre. Elles ont rapidement conduit à identifier les contraintes spécifiques à l'environnement confiné d'un tunnel routier :

- l'espace est géométriquement contraint ; le mode de construction d'un tunnel routier implique une utilisation de l'espace restreinte du fait du coût de creusement ;
- les accès aux équipements de sécurité pour les usagers doivent être préservés. En effet, les équipements tels que les postes d'appel d'urgence et les issues de secours ont été mis en place afin d'améliorer la sécurité dans les tunnels routiers en cas d'incendie. Ils permettent

une meilleure alerte, ainsi qu'une meilleure gestion des événements afin que l'auto-évacuation des usagers soit la plus efficace possible. De fait, l'accès à ces équipements doit rester permanent et ne peut être contraint par d'autres stratégies ;

- les équipements de protection susceptibles d'être mis en place doivent respecter les critères en matière de réaction au feu : absence de matières toxiques ou inflammables susceptibles de provoquer un incendie ou de dégager des fumées toxiques.

Ces contraintes spécifiques aux ouvrages souterrains constituent le support de toutes les réflexions menées sur le traitement des obstacles latéraux en tunnel routier.

LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE ET JURIDIQUE

2.1 LA RÉGLEMENTATION FRANÇAISE RELATIVE AU TRAITEMENT DES OBSTACLES LATÉRAUX

L'évolution réglementaire européenne sur les produits de construction a conduit la France à réorganiser la réglementation nationale dans le domaine des équipements de la route.

Les dispositifs de retenue routiers, considérés comme des produits de construction, sont couverts par des normes européennes harmonisées et doivent désormais posséder un marquage CE pour être commercialisés et mis en œuvre. Leurs performances et leurs règles de mise en service doivent être conformes à l'arrêté RNER – DRR [1] (Réglementation Nationale des Équipements de la Route des dispositifs de retenue routiers) du 2 mars 2009 modifié par les arrêtés du 28 août 2014, du 3 décembre 2014, du 4 juillet 2019 et du 18 novembre 2021.

L'article 2 de l'arrêté RNER précise que « la décision d'installation de dispositifs de retenue résulte d'une analyse de la configuration de la section de voie traitée prenant en compte notamment la probabilité d'accidents et de sorties de chaussée, les conséquences pour les divers usagers, pour

les tiers ou l'environnement, les gains escomptés de sécurité, les contraintes d'exploitation ainsi que, le cas échéant, les avantages d'un autre mode d'aménagement mieux adapté au vu des contraintes de sécurité inhérentes à l'utilisation de ce type d'équipements ».

L'arrêté RNER [1] définit les niveaux de performances minimum à respecter pour les dispositifs de retenue mis en service sur les routes où la limitation de vitesse est supérieure ou égale à 70 km/h. Ces niveaux de performances dépendent entre autres du type de route, de la limitation de vitesse, de la position du dispositif (terre plein central, accotement).

Concernant la protection des obstacles latéraux, les exigences minimales de performance des barrières de sécurité en accotement sont décrites dans l'article 3, celles relatives aux atténuateurs de choc sont décrites dans l'article 5. Ces niveaux de performance minimum exigés font référence à la norme NF EN 1317 [2] de septembre 2010.

2.2 LA RESPONSABILITÉ DU MAÎTRE D'OUVRAGE

Les analyses juridiques pilotées par le CETU démontrent que dès que le maître d'ouvrage a connaissance de dispositions techniques qui sont de nature à améliorer la sécurité au droit d'un obstacle en tunnel, et que l'enjeu correspondant en matière de sécurité est avéré, il se doit d'envisager leur mise en œuvre, et cela même si ces dispositions ne respectent pas strictement les normes en vigueur à l'air libre.

La difficulté d'interprétation de ces analyses réside dans la définition de ce qui peut être de « nature à améliorer la sécurité ». Le marquage CE est une garantie qui démontre que l'équipement répond à certaines normes techniques et a acquis, de fait, l'autorisation de mise en place sur l'ensemble du territoire de la communauté européenne. Il indique que le fabricant ou l'importateur a contrôlé la conformité du produit aux obligations fondamentales en matière de sécurité,

d'hygiène et de protection de l'environnement. Selon le cas, la conformité peut être attestée aussi par un organisme de contrôle tiers.

Dans la mesure du possible, le choix des équipements pouvant être mis en place devra donc s'orienter vers un équipement marqué CE, vers un équipement répondant aux normes françaises pour les barrières de sécurité en béton (NF 98 426) ou si cet équipement n'existe pas, vers un équipement dont les caractéristiques s'en rapprochent le plus possible. Enfin, le code de la voirie routière (Article R119-10) précise que des dispositifs innovants ou expérimentaux peuvent être mis en service sur certaines sections des voies du domaine public routier. Des autorisations d'emploi à titre expérimental sont, dans ce cas, accordées aux fabricants, importateurs ou gestionnaires de voirie.

DÉMARCHE POUR PRENDRE EN COMPTE LA SÉCURITÉ LIÉE AUX OBSTACLES LATÉRAUX

Cette démarche comporte les étapes suivantes :

- recensement des obstacles ;
- suppression de certains obstacles ;
- hiérarchisation du risque associé aux obstacles restants ;
- traitement des obstacles restants.

3.1 RECENSEMENT DES OBSTACLES

La première étape de la démarche consiste à recenser l'ensemble des obstacles latéraux pouvant exister en tunnel.

3.1.1 Définition de l'obstacle latéral

La notion d'obstacle est clairement définie dans le contexte à l'air libre. Un obstacle désigne tout objet latéral (par rapport à la chaussée), disposition ou ouvrage fixe, ponctuel ou continu, qui est susceptible d'aggraver, en cas de heurt, les conséquences d'une sortie accidentelle d'un véhicule de la chaussée, notamment en occasionnant un blocage ou en favorisant un retournement (tonneau) du véhicule.

3.1.2 Les obstacles latéraux présents en tunnel

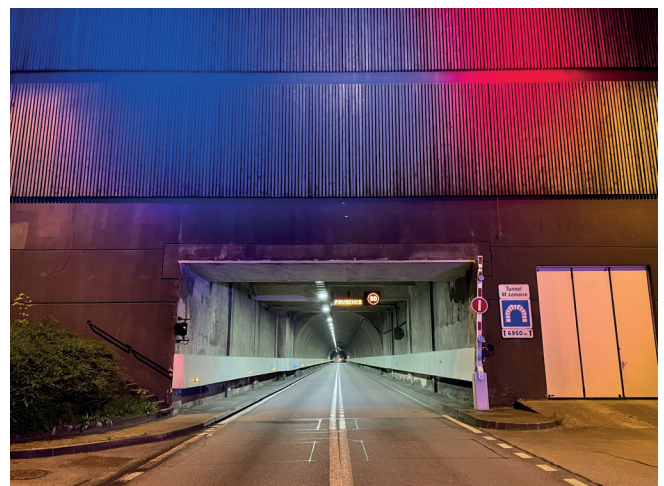
Le guide technique du CEREMA [3] sur le traitement des obstacles latéraux sur les routes principales hors agglomération de 2002 explicite la notion d'obstacles au travers d'exemples.

Parmi ceux-ci, et au regard de la définition ci-avant, peuvent être retenus dans le cadre des tunnels routiers des obstacles ponctuels tels que :

► Les piles d'ouvrage d'art (assimilables aux têtes du tunnel)



Source : CETU



Source : CETU

Dans le guide CEREMA de 2022 [4], le traitement des têtes de tunnel est abordé dans le chapitre 5 relatif aux dispositions particulières – 5.5.8 Entrées-sorties de tunnel

- ▶ Les murs faisant une saillie verticale (murs de fond des garages, murs de by-pass véhicules, murs de galeries de retournement, de locaux techniques...)



Source : CETU



Source : CETU

- ▶ Les murs d'extrémité des élargissements ponctuels de chaussées ou les murs en retour au droit d'une modification de profil en travers



Source : CETU

- ▶ Les murs relatifs à l'implantation d'une bretelle de sortie



Source : CETU



Source : Nice Métropole

- ▶ Les bordures ayant une hauteur de plus de 20 cm par rapport au niveau de la chaussée. *En tunnel, Il est admis que les bordures de trottoirs jusqu'à la limite autorisée de 0,25 m ne sont pas considérées comme des obstacles latéraux (cf. 3.1.3).*

- ▶ Les débouchés des inter-tubes et les accès aux issues de secours



Source : CETU

- ▶ Les niches de sécurité ouvertes et les niches incendies

Nota : concernant les poteaux incendies, le CETU préconise l'emploi de poteaux équipés d'un dispositif de renversabilité (cf. 3.1.3)



Source : CETU



Source : CETU



Source : CETU

- ▶ Les fûts de barrière de fermeture de voie (Barrière XK3 IISR, partie 9, article 161) et les accélérateurs fixés en piédroit



Source : CETU



Source : CETU

3.1.3 Les éléments à ne pas considérer comme des obstacles latéraux en tunnel

Le piédroit du tunnel

Le mur piédroit, inhérent à l'ouvrage souterrain, ne peut être considéré comme un obstacle à la circulation dans la mesure où celui-ci court le long du tunnel sans discontinuité et ne peut occasionner de blocage du véhicule en cas d'impact.

Les bordures et trottoirs

Le guide technique du Cerema sur le traitement des obstacles latéraux sur les routes principales hors agglomération de 2002 [3] précise que :

« Les bordures ou trottoirs ne sont pas considérés comme des obstacles dans la mesure où ils **n'excèdent pas 20 cm de hauteur de vue**. Au-delà, il s'agit de véritables murets et sont donc à traiter comme tels.

Heurtées par un véhicule, les bordures peuvent favoriser une perte de contrôle, et cela d'autant plus qu'elles sont hautes. Aussi, elles ne doivent pas excéder la hauteur juste utile pour assurer leur fonction (délimitation, dissuasion...) ».

L'annexe n°2 à la circulaire interministérielle n°2000 63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national [6] précise dans le chapitre 2 relatif aux dispositions de génie civil qu'« un trottoir doit être aménagé à droite de chaque sens de circulation afin de permettre aux usagers en détresse ayant dû quitter leur véhicule d'atteindre les équipements de sécurité, ou de sortir du tunnel, en restant en dehors du gabarit latéral de circulation.

Ce trottoir d'une **hauteur maximale de 0,25 m** ne sera pas séparé de la chaussée par une bordure ou un autre dispositif dépassant cette hauteur ».

Il est admis que les bordures de trottoirs jusqu'à la limite autorisée de 0,25 m en tunnel ne sont pas considérés comme des obstacles latéraux.

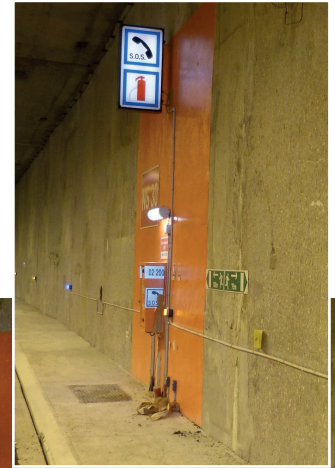
Les postes d'appel d'urgence en saillie

Un poste d'appel d'urgence (PAU) est un équipement normalisé (NF P 99-250 et 251). Fusible, il ne constitue pas un obstacle et peut être implanté à 1 m d'une surface roulable. Son socle ne doit présenter aucune agressivité s'il est en saillie par rapport à l'accotement.

La réglementation relative à la sécurité des tunnels routiers impose que les postes d'appel d'urgence soient implantés dans des niches de sécurité. Ces dernières sont positionnées sur le côté droit de chaque sens de circulation.

L'implantation en saillie en piédroit est par conséquent une solution exceptionnelle qui répond à des contraintes spécifiques (contraintes de génie civil dans des tunnels existants notamment).

Lorsque les postes d'appel d'urgence sont implantés en saillie en piédroit, la fusibilité du poste conjuguée à une installation sans socle permet de ne pas les considérer comme des obstacles latéraux.



Rocade L2 – Source : CETU

Les poteaux incendie

Le CETU préconise l'emploi de poteaux équipés d'un dispositif de renversabilité en cas de force appliquée au-dessus du niveau du sol.

La norme NF EN 1074-6 définit la gamme de forces à appliquer pour briser un poteau équipé d'un dispositif de renversabilité. Le poteau doit rester étanche après s'être renversé et aucun des éléments se situant en dessous du dispositif de renversabilité ne doit être détérioré.



Rocade L2 – Source : CETU

3.2 SUPPRESSION DE CERTAINS OBSTACLES

Une fois le recensement des obstacles présents en tunnel réalisé, l'exploitant doit examiner la possibilité de supprimer ces obstacles s'ils ne conditionnent pas directement la sécurité des usagers. C'est le cas par exemple, des obstacles tels que les murs en retour, ou les angles saillants liés à une réduction du profil en travers de l'ouvrage. A contrario, certains obstacles liés à des équipements fondamentaux pour la sécurité des usagers ne pourront pas être supprimés.

Cet examen sur la possibilité de supprimer l'obstacle, qui explicite la justification du maintien ou non d'un obstacle, doit être formellement « tracé » par l'exploitant.

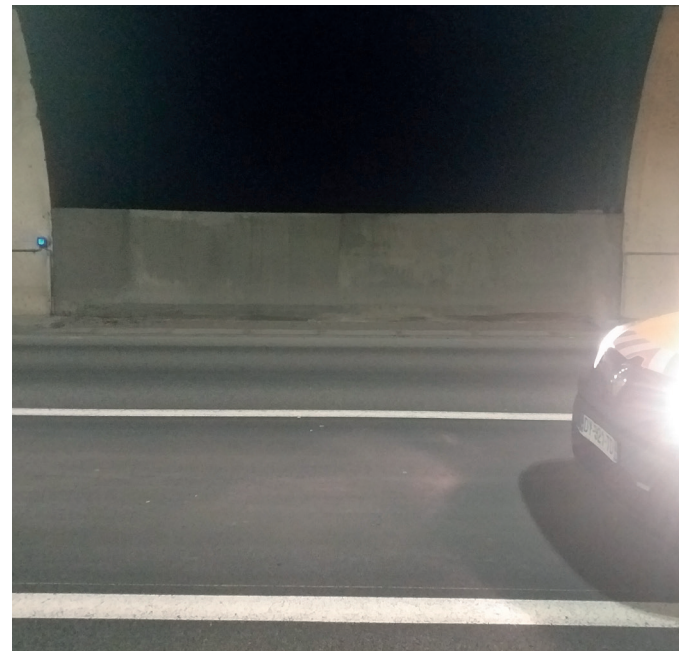
Par exemple, certains tunnels disposent d'aire de retournement afin de permettre aux véhicules de secours de pouvoir faire demi-tour.

Lorsque la stratégie opérationnelle des services de secours ne prend pas en compte ces aires de retournement, il peut être envisagé de supprimer ces aires de retournement après accord des services de secours.

Le tunnel de Siaix, situé sur la RN90 en Savoie, disposait ainsi d'une aire de retournement conformément à la réglementation (article 2.3.1 de l'instruction technique 2000-63). Des échanges entre le SDIS et l'exploitant ont permis de fermer cette aire de retournement dont l'utilité opérationnelle s'avérait discutable, cette aire de retournement n'étant pas prévue dans les modes opératoires d'intervention du SDIS de Savoie. La largeur roulable du tunnel (10,60 m) permet en effet le retournement des véhicules du SDIS.



Tunnel de Siaix avant – Source : DIRCE



Tunnel de Siaix après – Source : DIRCE

3.3 HIÉRARCHISATION DU RISQUE ASSOCIÉ AUX OBSTACLES RESTANTS

Suite au recensement des obstacles latéraux en tunnel, la hiérarchisation du risque associé à ces obstacles est importante pour en prioriser le traitement.

Ce sujet a d'ores et déjà fait l'objet de nombreuses réflexions dans le contexte des routes à l'air libre, car les obstacles y sont innombrables, et les enjeux de sécurité associés considérables. Le principe de la « route qui pardonne », c'est-à-dire qui prend en compte les erreurs fortuites de comportement des usagers est appliqué dans la mesure du possible. Dans ce cadre-là, c'est la limitation de la gravité des chocs qui est recherchée. Cette démarche est appelée « sécurité secondaire » par opposition à la « sécurité primaire » qui vise à limiter la fréquence des accidents (prévention).

Le guide technique [3] sur le traitement des obstacles latéraux préconise une méthodologie selon 4 étapes :

1. Réalisation d'un diagnostic de situation avec possibilité de calcul d'un indice de risque ;
2. Définition d'une stratégie d'action en fonction du diagnostic et des moyens disponibles ;
3. Élaboration d'un programme d'intervention pluriannuel ;
4. Évaluation des actions réalisées.



L'indice de risque calculé dans le guide du SETRA a été adapté par le CETU en collaboration avec le CEREMA au contexte particulier des tunnels routiers afin que soient pris en compte le risque propre à l'obstacle, ainsi que le risque supplémentaire induit par le tunnel lui-même. En effet, dans le cas particulier des garages (ou des changements de section), le piédroit peut apporter un risque supplémentaire par rapport à la situation en section courante du fait du guidage éventuel d'un véhicule jusqu'à l'obstacle final que représente le fond du garage.

Le calcul de l'indice de risque permet ainsi une hiérarchisation des obstacles latéraux au sein d'un même ouvrage ou d'une même section de route comportant des tunnels aux caractéristiques identiques. Cette hiérarchisation apporte des éléments d'aide à la décision pour la démarche de traitement des obstacles latéraux en tunnel.

Ses modalités d'application spécifiques aux tunnels routiers sont présentées en annexe.

3.4 LE TRAITEMENT DES OBSTACLES RESTANTS

Pour tous les obstacles ne pouvant être supprimés, se pose la question des actions à mener afin d'améliorer la sécurité. Dans le cas où un obstacle ne pourrait être traité, car son traitement risquerait de dégrader la fonction de sécurité associée (une issue de secours par exemple), il est recommandé que le gestionnaire de l'infrastructure conserve la justification de la démarche qui lui a permis d'aboutir à cette décision.

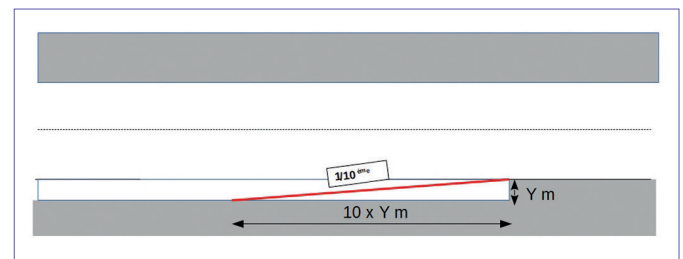
3.4.1 Cas des changements de section

Le cas des changements de section est relativement peu fréquent en tunnel. Ces configurations font généralement suite à une réduction du profil en travers de l'ouvrage.

Le traitement de l'obstacle que constitue le délaissé frontal du changement de section se fera par l'implantation d'un dispositif de retenue (barrière de sécurité, Glissière en Béton Armé (GBA)) ou d'un ouvrage maçonné permettant de relier les deux piédroits.

À l'air libre, l'implantation d'un dispositif de retenue obéit à des règles précisées dans le guide CEREMA de 2022 [4] relatif à l'installation des dispositifs de retenue en section courante. Le biseau d'implantation présente alors une pente maximale de $1/40^e$.

Exceptionnellement, en raison de contrainte d'exploitation, de limitation d'emprise, de coût, le biseau pourra avoir une pente de $1/10^e$ pour une vitesse autorisée inférieure ou égale à 110 km/h.



Implantation d'un dispositif de retenue en tunnel lors d'un changement de section

En tunnel, les contraintes en termes d'emprise disponible peuvent être plus importantes et éventuellement nécessiter une adaptation des règles d'implantation.

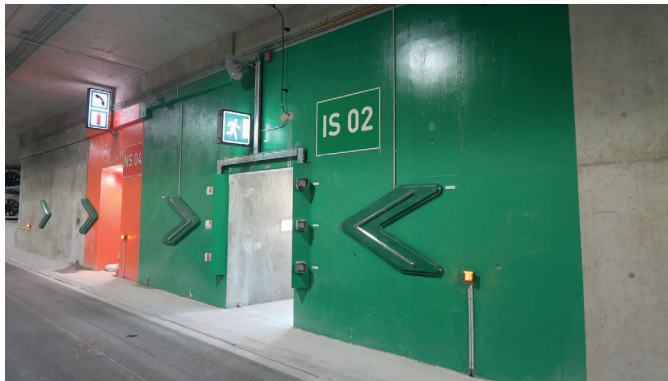


Tunnel de Toulon avant traitement – Source : CETU



Tunnel de Toulon après traitement – Source : Vinci Autoroute

3.4.2 Cas des obstacles constitués par des décrochés dans les piédroits

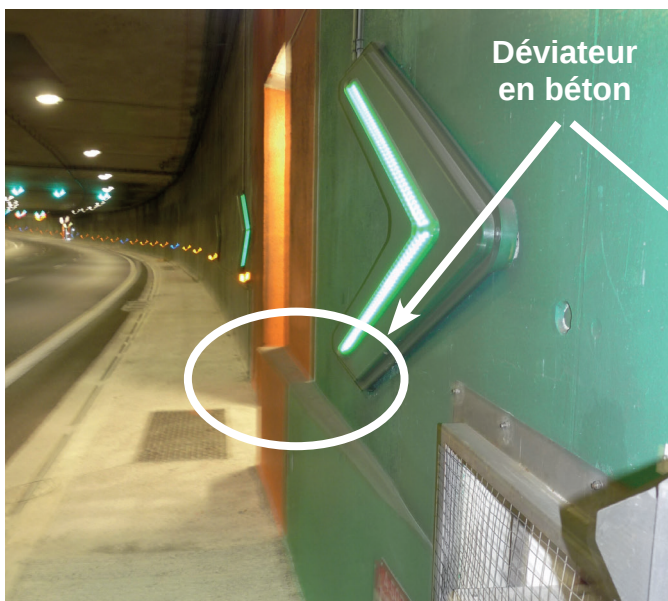


Rocade L2 – Source : CETU

Les niches de sécurité, les issues de secours ou encore les niches incendies sont des dispositifs essentiels de sécurité dans les tunnels, mais qui peuvent représenter des obstacles latéraux.

Leur protection, sans perturber leur fonctionnalité, est souvent très difficile. Néanmoins, dans certains cas et selon certaines configurations, des dispositions peuvent être mises en œuvre.

Ainsi par exemple, dans une tranchée couverte à circulation monodirectionnelle, une niche implantée dans une zone en courbe avec un abaissé de trottoir en amont permettant d'accéder à une issue de secours présentait une configuration particulière et un indice de risque élevé (méthodologie de calcul spécifique aux tunnels en annexe 1). Comme il n'était pas possible de supprimer cette niche de sécurité, la réalisation d'un **déviateur en béton** a permis de diminuer le risque de choc frontal sur le mur de la niche en cas de sortie de route.



Rocade L2 – Source : DIRMED



Dans les tunnels à deux tubes équipés de by-pass véhicules (articles 2.2.1 et 2.3.1 de l'instruction technique 2000-63 [6]), il peut être intéressant d'implanter un atténuateur de choc de faible dimension qui permet de protéger l'obstacle, à la condition que ces communications accessibles aux véhicules de secours et aux piétons (en cas d'autoévacuation) puissent garder leur fonction initiale.

Ce type d'aménagement est réglementairement possible en France sous réserve d'implanter un atténuateur homologué.

Des réalisations de ce type peuvent être observées en Italie.

À noter que ces atténuateurs de faible dimension ne permettent pas d'arrêter un bus ou un poids lourds (cf. 3.4.3.4).



Source : PIARC

3.4.3 Cas des obstacles en garage

L'annexe n° 2 à la circulaire interministérielle n°2000- 63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national [6] précise que : « Dans les tunnels de plus de 1 000 m de longueur qui ne sont pas à faible trafic, lorsque la largeur disponible pour les véhicules ne permettra pas la circulation sur le nombre nominal de files au droit d'un véhicule arrêté, des garages seront prévus tous les 800 m environ. »

Les garages sont dès lors des équipements de sécurité et leur suppression n'est pas envisageable.

Les dispositifs d'alerte et de prévention

Des mesures de prévention telles que des bandes sonores de rive ou des balises J13 peuvent être mises en place. Des mesures de protection peuvent aussi être envisagées en fonction de la configuration géométrique existante.

Les bandes sonores de rive

Les bandes sonores de rive permettent de lutter contre l'hypovigilance (état intermédiaire entre la veille et le sommeil, se manifestant par une baisse de vigilance) en alertant l'usager lors du déport de son véhicule sur la ligne de marquage de rive ou au-delà.

À noter que depuis le 1^{er} avril 2022, les sections d'autoroutes doivent être équipées de Dispositifs d'Alerte Sonore (DAS) permanents implantés sur la rive droite de la chaussée lorsque le bruit supplémentaire qu'ils créent n'est pas susceptible de gêner les habitations riveraines (arrêté du 14 janvier 2020 relatif à l'équipement des routes et autoroutes de dispositifs d'alerte sonore [5]).

Constituent des DAS permanents :

- les dispositifs en protubérance de type « barrette » ;
- les dispositifs de type engravure, réalisés par fraisage de la couche de roulement.



Tunnel de la Joliette – Source : BG Ingénieurs Conseils

Les spécifications techniques sont définies dans l'annexe à l'arrêté du 14 janvier 2020.

Ces dispositifs sont peu coûteux et relativement faciles à mettre en œuvre. Ils peuvent être mis en place en amont d'un garage (sur un linéaire correspondant à deux secondes de temps de parcours à la vitesse maximale autorisée) ainsi qu'au droit de celui-ci par exemple. En cas de perte de vigilance, la mise en alerte de l'usager peut lui permettre de corriger rapidement sa trajectoire.



Source : CETU

La balise J13

Dans l'Instruction Interministérielle sur la Signalisation Routière (IISR) ; 1^{ère} partie modifiée par l'arrêté du 9 avril 2021 [6], il est indiqué que :

« Les balises J13 ont pour objet de signaler :

- des ouvrages ou éléments d'ouvrage situés à proximité immédiate de la chaussée, à une distance inférieure à 1 m de la surface revêtue, et pouvant constituer des obstacles dangereux. »

[...]

Pour les ouvrages, la signalisation par balise J13 est mise en place pour chaque obstacle, qu'il s'agisse d'un obstacle seul ou de deux obstacles situés de part et d'autre de la chaussée. Hormis pour les tunnels et les tranchées couvertes, elle doit être perceptible pour les deux sens de circulation si l'obstacle signalé concerne les deux sens de circulation... »

Dans le cas des tunnels routiers, l'implantation d'une balise J13 peut être un moyen peu coûteux et relativement facile à mettre en œuvre.



Les dispositifs de protection : les prérequis

Les prérequis relatifs à la géométrie

Avant toute mise en place d'une mesure de protection en extrémité de garage, la question de la place disponible pour protéger l'obstacle se pose naturellement. La longueur maximale disponible a été déterminée en ôtant de la longueur classique des garages, soit 40 m, la longueur minimale utile à différents types de véhicules (poids lourds, autocar) pour se garer en marche avant.

Les dimensions des véhicules de grande longueur prises en compte sont les suivantes :

	Longueur
Car / Bus	15,00 m
Semi-remorque	16,50 m
Porteur + remorque	18,75 m
Porte-voitures	20,35 m

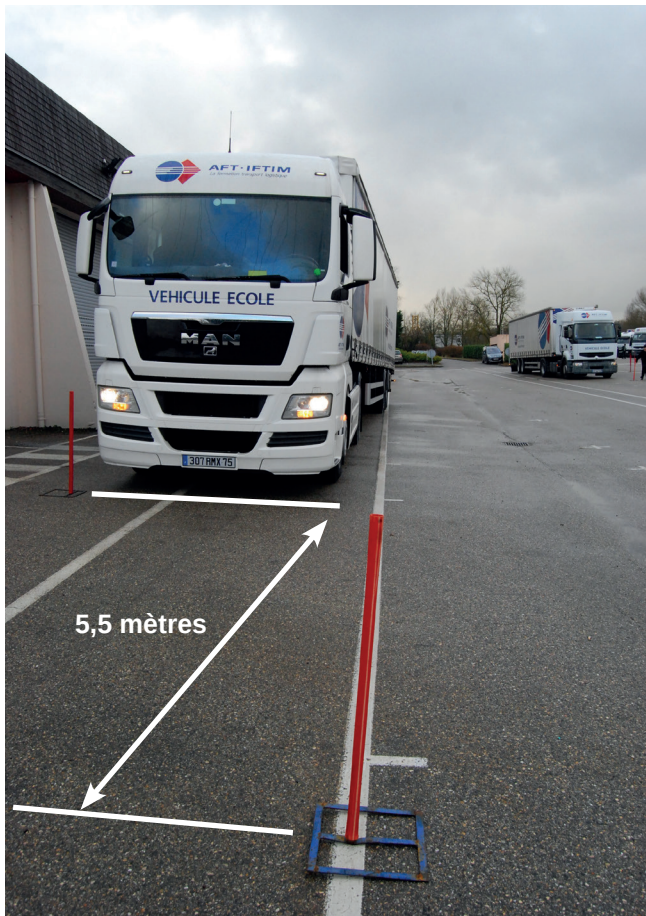
Des essais ont été réalisés avec un camion semi-remorque (16,5 mètres de long) et un camion porteur avec remorque (18 mètres), à vitesse lente (manœuvre) et à vitesse plus soutenue (environ 40 km/h). Dans tous les cas, l'arrêt du véhicule a été réalisé au moment où l'essieu arrière a franchi la ligne de rive du garage.

Ces essais ont montré que le camion semi-remorque exige un espace minimal de 34,5 mètres, et que le camion avec remorque exige 38 mètres pour écarter le dernier essieu de la chaussée.

Ces distances ont été déterminées sans marge apparente. En fonction du dévers du garage et de la chaussée, le haut de l'arrière du camion peut provoquer des accrochages avec d'autres poids lourds en circulation.

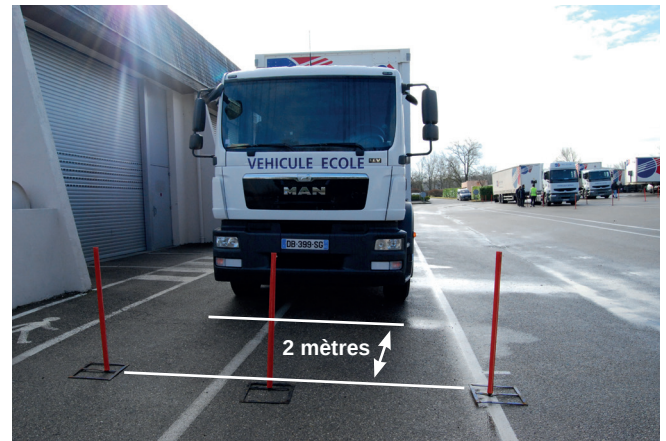
En conclusion, la distance minimale qui peut être retenue pour garer un poids lourd de type camion semi-remorque en marche avant dans un garage (emplacement d'arrêt d'urgence) est de **35 mètres**. Cette distance doit être adaptée au trafic et à la géométrie du tunnel concerné car elle ne permet pas d'isoler complètement de la circulation les camions porteurs avec remorque, ainsi que les porte-voitures.

- ▶ Stationnement en marche avant d'une semi-remorque (longueur 16,5 m) dans un garage de 3 m x 40 m



Source : CETU

- ▶ Stationnement en marche avant d'un porteur + remorque (longueur 18 m) dans un garage de 3 m x 40 m



Source : CETU

Les prérequis relatifs à la caractérisation de la sévérité d'un choc

Le niveau de sévérité de choc est obtenu à l'aide de deux indices de sévérité de chocs suivants :

- l'ASI (*Acceleration Severity Index*): il donne une mesure de la sévérité du mouvement de décélération subie par une personne située à l'intérieur du véhicule durant un impact. Un ASI supérieur à 1,9 traduit une décélération trop importante pour être acceptable par le corps humain ;
- le THIV (*Theoretical Head Impact Velocity*): il mesure la vitesse d'un impact de la tête d'un passager contre une surface à l'intérieur d'un véhicule. Il ne doit pas

dépasser les 33 km/h dans le cas de barrières et les 44 km/h pour les essais frontaux ou 33 km/h pour les essais latéraux dans le cas d'atténuateurs de choc.

Une étude menée en collaboration avec le LIER-TRANSPOLIS a permis de réaliser des simulations visant à mesurer la sévérité des impacts avec ou sans dispositif de retenue.

Le tableau ci-après montre que pour un dispositif de retenue de type « GBA », et pour toutes les configurations d'angle et de vitesse, la gravité des accidents pour un véhicule léger est nettement plus faible que celle obtenue en l'absence de dispositif.

		Angle d'impact par rapport au dispositif			Sans dispositif	
		15°	20°	25°		
Vitesse d'impact du véhicule [km/h]	60	ASI	0,8	1,0	1,2	3,0
		THIV [km/h]	20,6	20,8	23,9	65,7
		Vitesse de sortie [km/h]	44,6	43,1	42,0	
		Angle de sortie [°]	19,9	20,0	21,5	
		Roulis	8,7	11,8	20,6	
	80	ASI	1,0	1,3	1,7	4,4
		THIV [km/h]	21,1	23,4	31,4	90,6
		Vitesse de sortie [km/h]	65,6	62,8	58,5	
		Angle de sortie [°]	20,8	16,7	22,8	
		Roulis	13,5	36,6	32,9	
	100	ASI	1,2	1,7	2,2	7,1
		THIV [km/h]	23,0	30,0	42,0	118,2
		Vitesse de sortie [km/h]	85,5	79,8	73,8	
		Angle de sortie [°]	16,1	13,4	30,1	
		Roulis	37,8	59,8	57,7	

Source : étude CETU LIER TRANSPOLIS

Les prérequis techniques liés aux tunnels

Les dispositifs de retenue de type barrière / GBA ne peuvent être implantés que dans les tunnels unidirectionnels dans la mesure où ces équipements de sécurité renvoient systématiquement le véhicule sur la voie de circulation.

Les atténuateurs de choc ne doivent en outre pas comporter de substance dangereuse susceptible d'aggraver la toxicité des fumées en cas d'incendie et ne doivent pas générer, en cas de chocs, de projectiles qui viendraient rebondir sur le piédroit du tunnel.

En termes de fonctionnalité, les atténuateurs de choc doivent permettre de limiter les conséquences liées à l'impact d'un bus de transport de passagers.

Les dispositifs de protection : les dispositifs de retenue

La norme relative aux dispositifs de retenue est la norme NF EN 1317 [2]. Cette norme définit les performances des dispositifs de retenue. Elle évalue l'efficacité du dispositif de retenue grâce à des essais de choc réalisés en grandeur réelle.

Le guide d'implantation des dispositifs de retenue [4] préconise un déport recommandé de 1/40 et un déport maximum de 1/10 (cf. 3.4.1).

Pour un mur de fond de garage de largeur usuelle de 3 mètres, ces préconisations impliquent une implantation de dispositif de retenue sur une longueur de 32 mètres avec un déport de 1/10.

Le garage d'une longueur usuelle de 40 mètres n'est donc plus utilisable.

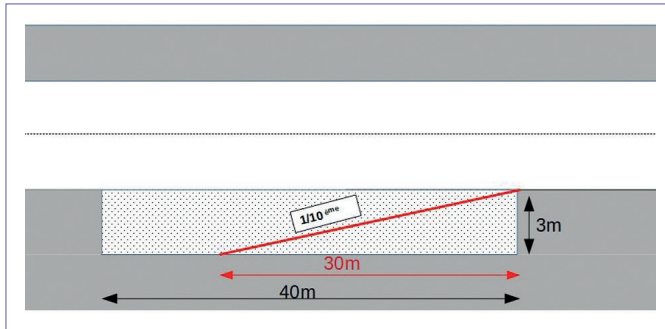
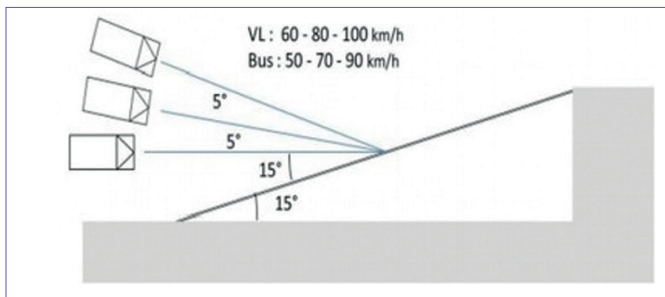


Schéma d'implantation d'un dispositif de retenue dans un garage avec un déport de 1/10

Néanmoins, une étude menée avec le LIER-TRANSPOLIS montre que pour les deux dispositifs de retenue de type barrière « BN4 » et « GBA », et pour toutes les configurations d'angle et de vitesse, la gravité des accidents est nettement plus faible que celle obtenue en l'absence de dispositif.

L'étude menée avec une barrière métallique « BN4 » n'est pas détaillée ici. Les résultats obtenus sont quasi similaires à ceux obtenus pour les barrières en béton « GBA », et les hypothèses de modélisation (encastrement des extrémités des trois lisses notamment) nécessitent le développement d'une solution technique pour la mise en œuvre.



L'ensemble des configurations montrent que la mise en place d'une barrière en béton positionnée selon un angle de 15° par rapport à l'axe de la chaussée constitue un moyen de protection



Source : PIARC - Espagne

susceptible d'améliorer la sécurité des usagers d'un véhicule léger ou d'un bus dans le cas d'une collision sur le mur du fond d'un garage, notamment pour les vitesses inférieures à 90 km/h. Les valeurs d'ASI et THIV obtenues « avec dispositif » sont globalement équivalentes au tiers de celles obtenues « sans dispositif », que ce soit pour les véhicules légers ou pour les bus.

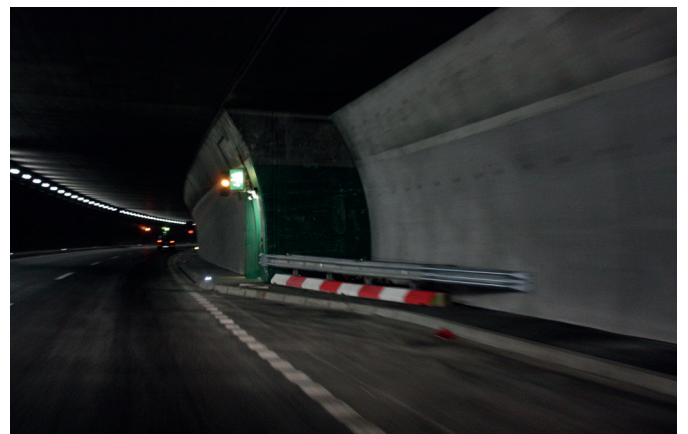
Pour les véhicules légers, la majorité des configurations satisfait les critères d'acceptation de la norme EN1317-2 [2]. Les simulations à 60 et 80 km/h montrent des résultats acceptables. Les simulations à 100 km/h ont montré un retournement du véhicule pour un angle d'impact supérieur ou égal à 20°, auquel s'ajoute un impact trop sévère pour un angle d'impact supérieur ou égal à 25°.

Pour les bus, le cas le plus sévère entraîne le retournement du bus.

Pour ces dispositifs, la limitation de la vitesse de circulation est une mesure simple et un facteur de premier ordre afin de limiter les conséquences d'un impact.

L'angle de sortie du véhicule étant très proche de l'angle d'implantation du dispositif de retenue, il faudrait qu'il soit le plus faible possible pour permettre une réinsertion du véhicule dans sa voie de circulation après impact sur le dispositif de retenue. Diminuer l'angle d'implantation nécessite de neutraliser un plus grand espace dans le garage, alors même que cet espace a été optimisé pour servir d'emplacement d'arrêt d'urgence pour les véhicules en détresse. Aussi, en première approche, une implantation à 15° du dispositif de retenue apparaît comme un bon compromis permettant de protéger l'obstacle que constitue le mur du fond du garage tout en préservant la fonction d'emplacement d'arrêt d'urgence.

Étant donné le renvoi systématique du véhicule sur la voie de circulation, la mise en place d'une barrière peut être une solution de retenue efficace dans les tunnels unidirectionnels uniquement, et à la condition de garder la fonctionnalité initiale du garage. L'angle d'implantation sera à définir au cas par cas en fonction des caractéristiques géométriques et fonctionnelles associées au garage.



Tunnel de Sierre après l'accident de 2012 – Source : CETU

Les dispositifs de retenue de type atténuateur de choc

Les atténuateurs de choc sont des dispositifs de retenue frontaux permettant de réduire la violence de l'impact d'un véhicule contre un obstacle. Ils peuvent être installés soit dans la continuité d'un autre dispositif de retenue, soit de manière indépendante.

Les atténuateurs de chocs homologués selon la norme EN 1317-3 [2] ne sont pas caractérisés en termes de redirectivité. Seule la réalisation de crash-tests spécifiques permet d'étudier plus précisément le caractère redirectif d'un atténuateur.

Même si les atténuateurs répondant à la norme EN 1317-3 [2] ne permettent pas de satisfaire à toutes les attentes techniques et fonctionnelles, l'implantation de ces atténuateurs permet de diminuer le risque de blessure sévère en cas de choc frontal d'un véhicule léger sur un fond de garage.

En effet, des simulations identiques aux essais décrits dans la norme EN 1317-3 pour les atténuateurs de choc



Source : DGITM / FCA

non redirectifs aboutissent à des résultats répondant aux exigences de la norme selon les critères ASI et THIV. Les véhicules légers modélisés, qu'ils soient de 900 kg ou de 1300 kg, ne subissent pas de renversement, y compris après le choc sur l'atténuateur de choc, et restent positionnés dans l'axe du dispositif de retenue.

En ce qui concerne les modélisations réalisées avec un bus, on peut observer un écrasement complet du dispositif de retenue. Le bus, sans se renverser, finit sa course dans l'obstacle, mais avec une vitesse moindre. En effet, le dispositif de retenue permet une absorption d'énergie conséquente, ce qui entraîne l'abaissement de sa vitesse initiale fixée à 70 km/h à environ 20 km/h au moment de l'impact sur l'obstacle. Le bus ne subit pas de renversement et reste positionné dans l'axe du dispositif de retenue.

Dès lors que la fonction de garage est assurée et permet notamment à un poids lourd de se garer en marche avant et d'être isolé de la circulation, le CETU recommande l'implantation d'un atténuateur de choc en fond de garage.



CONCLUSION

Suite à l'accident de Sierre survenu en mars 2012, la problématique des obstacles latéraux en tunnel routier est devenue une préoccupation renforcée pour de nombreux pays. Aucune solution évidente ne s'est toutefois imposée à ce jour. Compte tenu de l'occurrence très faible liée à ces risques spécifiques dans les ouvrages souterrains, les pays européens sont unanimes pour s'opposer à la fermeture systématique des éléments de sécurité comme les garages même si ces derniers peuvent parfois représenter un obstacle pour l'utilisateur.

D'autres solutions doivent donc être envisagées.

Le CETU a réalisé un travail de recherche afin de proposer une démarche visant à mieux prendre en compte la sécurité relative à ces obstacles latéraux en tunnel routier. En résumé, cette démarche se décompose en 4 étapes essentielles :

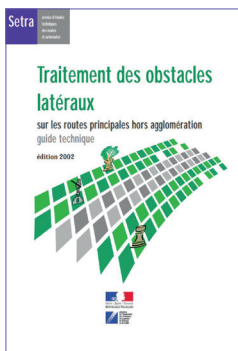
1. Le recensement de l'ensemble des obstacles présents dans le tunnel ;
2. L'examen de la possibilité de supprimer certains obstacles ;
3. La hiérarchisation du risque des obstacles qui ne peuvent pas être supprimés, fondée sur le calcul d'un indice de risque qui aidera l'exploitant à identifier les obstacles à traiter en priorité ;
4. Le traitement des obstacles qui n'ont pas pu être supprimés, avec, par exemple, la mise en place de mesures :
 - de prévention telles que les bandes sonores de rive, les balises J13,
 - de protection telles que les barrières (pour les tunnels unidirectionnels seulement) et les atténuateurs de choc pour les tunnels bidirectionnels.

Ces étapes doivent prendre en compte les caractéristiques particulières de chaque tunnel pour permettre un traitement adapté des obstacles latéraux existants.

Ces travaux montrent aussi combien il est important que la problématique « obstacles latéraux » soit prise en compte autant que possible très en amont, dès la conception des ouvrages.

ANNEXE : MODALITÉS D'APPLICATION DU GUIDE SETRA AUX TUNNELS

Sur les routes à l'air libre, les obstacles latéraux sont innombrables, et les enjeux de sécurité associés sont considérables. Le principe de la « route qui pardonne », c'est-à-dire qui prend en compte les erreurs fortuites de comportement des usagers est appliqué dans la mesure du possible. Dans ce cadre, c'est la limitation de la gravité des chocs qui est recherchée. Cette démarche est appelée « Sécurité secondaire » par opposition à la « Sécurité primaire » qui vise à limiter la fréquence des accidents (prévention).



Le SETRA a publié en 2002 un guide technique sur le traitement des obstacles latéraux sur les routes principales hors agglomération.

Une approche globale y est préconisée en 4 grandes étapes :

1. La réalisation d'un diagnostic de situation avec possibilité de calcul d'un indice de risque ;

2. La définition d'une stratégie d'action en fonction du diagnostic et des moyens disponibles ;
3. L'élaboration d'un programme d'intervention pluriannuel ;
4. L'évaluation des actions réalisées.

Cette annexe propose des modalités d'application du guide SETRA pour la partie 1 « Diagnostic de situation » dans le contexte particulier des tunnels routiers.

L'indice de risque calculé dans le guide du SETRA vient apporter une information sur le risque supplémentaire lié à un obstacle en tunnel par rapport au risque inhérent au tunnel lui-même.

Le calcul de l'indice de risque permet ainsi une hiérarchisation des obstacles latéraux au sein d'un même ouvrage ou d'une même section de route comportant des tunnels aux caractéristiques identiques. Cette hiérarchisation peut constituer une aide à la décision dans la démarche de traitement des obstacles latéraux en tunnel.

5.1 CALCUL DE L'INDICE DE RISQUE EN TUNNEL

5.1.1 Formule de calcul du guide du SETRA

Le danger que représente un obstacle donné dépend de plusieurs critères. Pour faciliter la hiérarchisation des obstacles à traiter, il est possible de s'aider d'indicateurs agrégés du risque tels que ceux décrits dans le guide du SETRA :

$$IR = Cs * Cp * Ce * Ca$$

- IR** Indice de risque
Cs Coefficient lié aux sorties de chaussée
Cp Coefficient lié au tracé en plan
Ce Coefficient lié à l'éloignement de l'obstacle
Ca Coefficient lié à l'agressivité de l'obstacle

5.1.2 Cs : coefficient lié aux sorties de chaussée

D'après le guide du SETRA, le coefficient Cs correspond au **nombre d'accidents corporels avec une sortie de chaussée par kilomètre**. Cette valeur est liée au trafic mais deux sections ou routes de même trafic peuvent avoir des valeurs de Cs différentes. Cette valeur est à calculer au cas par cas pour chaque section de route envisagée.

Dans la mesure où les accidents corporels ne sont pas aisément identifiables, ce coefficient peut être évalué en considérant de manière plus large l'ensemble des accidents de la circulation connus.

Des exemples de calcul du Cs sont donnés ci-dessous :

Tunnel	Nombre d'accidents corporels ayant eu lieu dans le tunnel pendant 5 ans (Nb années) A	Longueur du tunnel (km) B	Cs = A/B/ Nb années
X	10	1	2
Y	15	3	1
Z	25	2	2,5

Si aucune donnée ou aucun accident n'est connu, le coefficient lié aux sorties de chaussée est pris égal à 1 pour l'ensemble des obstacles répertoriés.

Selon l'historique de creusement du tunnel ou les caractéristiques environnementales associées, les deux tubes d'un même tunnel peuvent avoir deux accidentologies très différentes. Le calcul de l'indice de risque peut alors être réalisé en tenant compte de cette particularité : chaque tube se verra attribuer son propre coefficient lié aux sorties de chaussée.

5.1.3 Cp : coefficient lié au tracé en plan

Selon le guide du SETRA (page 14), les sorties de chaussée sont plus fréquentes vers l'extérieur de la courbe (63 % en extérieur contre 37 % en intérieur). Cependant pour un obstacle situé à l'intérieur de la courbe, le risque reste tout de même important.

Compte tenu de ces éléments, le coefficient lié au tracé en plan peut être défini de la manière suivante :

- Cp = 1 en alignement droit ;
- Cp = 2 en légère courbe. On prend le double si l'obstacle est situé à l'extérieur de la courbe ;
- Cp = 5 en courbe. On prend le double si l'obstacle est situé à l'extérieur de la courbe.

Le dossier pilote du CETU concernant la géométrie mentionne dans son paragraphe 3.3 « Tracé en plan et dévers associés » les différentes instructions possibles pour l'air libre (définition des rayons normal non déversé, rayons au dévers minimal...) et leur application pour les tunnels.

Dans le cas présent, seront considérés comme « en légère courbe » les portions de route ayant un rayon de courbure supérieur au rayon normal non déversé. Les portions de route ayant un rayon de courbure inférieur au rayon normal non déversé seront qualifiées de « en courbe ».

Ces données sont accessibles sur plan. L'évaluation visuelle du sens du dévers peut s'avérer être un moyen de terrain pratique pour préciser la qualification « en légère courbe » ou « en courbe ». Cependant, un dévers peut être réalisé soit pour des raisons de tracé en plan, soit pour des raisons d'écoulement de liquides. La qualification « en courbe » suite à évaluation visuelle doit donc faire l'objet d'une attention particulière afin de ne pas affecter un coefficient trop important ($\times 5$) à tort.

Des exemples de calcul et de coefficient sont illustrés au chapitre 6.4.

5.1.4 Ce : coefficient lié à l'éloignement de l'obstacle

Le risque de collision avec un obstacle est fonction décroissante de la distance de l'obstacle au bord de la chaussée. Le coefficient lié à l'éloignement de l'obstacle peut être défini de la manière suivante :

- Ce = 3,5 lorsque l'obstacle est situé à moins de 1,5 mètre ;
- Ce = 2 lorsque l'obstacle est situé entre 1,5 et 2,5 mètres ;
- Ce = 1 lorsque l'obstacle est situé entre 2,5 et 4 mètres ;
- Ce = 0,5 lorsque l'obstacle est situé à plus de 4 mètres.

La distance entre l'obstacle et le bord de chaussée est la distance entre le bord de la voie de circulation la plus proche de l'obstacle (ligne de rive) et la partie de l'obstacle la plus proche.

5.1.5 Ca : coefficient lié à l'agressivité de l'obstacle

Ce coefficient est défini dans le guide du SETRA de la manière suivante :

- Ca = 30 pour les arbres ;
- Ca = 20 pour les poteaux ;
- Ca = 20 pour les maçonneries ;
- Ca = 10 pour les fossés et talus.

Il correspond au nombre de tués pour 100 heurts de véhicules lors d'accidents corporels (tous réseaux confondus).

Dans le contexte des tunnels, on peut aisément estimer que le piédroit positionné perpendiculairement à l'axe de circulation qui constitue l'obstacle a la rigidité d'un arbre. Ce coefficient peut donc être fixé à 30.

Dans le cas d'un mur incliné, le schéma de principe pour traiter les extrémités des parapets de ponts et ponceaux du guide du SETRA présenté en introduction propose un positionnement avec un angle $1/5$ (soit 11°). Il peut donc être admis que toute barrière ou tout mur positionné avec un angle de 11° par rapport à la chaussée ne présente pas les caractéristiques d'un obstacle. Son Ca sera fixé à 0.

Calcul du Ca pour les murs inclinés positionnés par rapport à la route entre 11° et 90° (ainsi que pour les barrières béton).

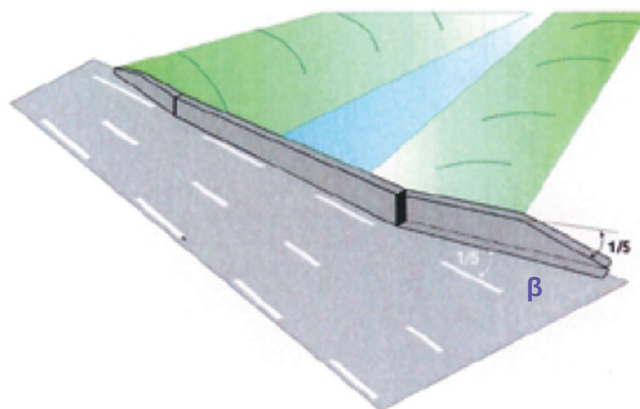


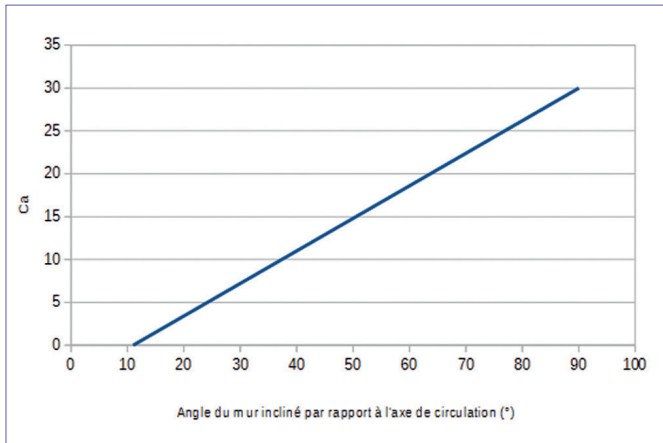
Schéma de principe pour le traitement des extrémités de parapet de ponts et ponceaux.

Pour les murs perpendiculaires à l'axe de circulation (soit ayant un angle de 90°), le Ca est considéré égal à 30.

Il peut être envisagé que le Ca d'un mur incliné varie entre ses deux points de manière linéaire en fonction de l'angle du mur par rapport à l'axe de circulation.

$$Ca = 0,38 * \beta - 4,18$$

avec β égal à l'angle du mur incliné par rapport à l'axe de circulation, le Ca sera calculé avec la courbe suivante :



Dans le cas particulier des garages, un indice de risque est affecté au piédroit qui dirige le véhicule vers le fond du garage. Le Ca de ce piédroit dépend de l'obstacle vers lequel sera dirigé le véhicule. Le paragraphe 6.2 « Application au cas particulier des garages » détaille ce cas.

5.1.6 Cd : coefficient lié à la dimension de l'obstacle

L'indice de risque ainsi défini dans le guide du SETRA ne permet pas de distinction entre un obstacle latéral ponctuel (poteau, $Ca = 20$) et un obstacle latéral de dimension plus importante (mur d'une maison, $Ca = 20$) situé dans des sections équivalentes en termes de tracé (même Cp), d'accidentologie (même Cs) et d'éloignement (même Ce). À l'air libre, la taille de l'obstacle sera en effet prise en compte lors de la mise en place éventuelle d'un dispositif de retenue qui sera dimensionné en fonction de la taille de l'obstacle.

Aussi, afin de pouvoir hiérarchiser le risque lié aux obstacles au sein d'un même tunnel, l'indice de risque a été complété en prenant en compte un coefficient lié à la dimension de l'obstacle. Ce coefficient Cd est pris égal à la distance parcourue sur la voie de circulation pour laquelle une sortie de route prise avec un angle de 20° entraînera un choc sur l'obstacle.

L'angle retenu pour représenter la probabilité de heurter l'obstacle est de 20°. Cet angle est l'angle maximal retenu dans le cadre de la norme EN 1317-2 pour tester les dispositifs de retenue de type barrière. De plus, il est majorant par rapport à l'angle moyen des sorties de route (10° selon le SETRA en page 54 du guide sur le traitement des obstacles latéraux) et par rapport à l'angle maximum retenu (15°) dans le cadre de la norme EN 1317-3 pour tester les dispositifs de retenue de type atténuateur de choc.

5.2 APPLICATION AU CAS PARTICULIER DES GARAGES

5.2.1 Garage avec mur du fond perpendiculaire à la chaussée

Dans le cas particulier des garages (ou des changements de section), le piédroit peut apporter un risque supplémentaire par rapport au piédroit en section courante du fait du guidage éventuel d'un véhicule jusqu'à l'obstacle final que représente le fond du garage.

L'indice de risque d'un tel équipement va donc se décomposer en deux parties : l'indice de risque du mur du fond du garage ajouté à l'indice de risque de la zone pouvant entraîner un choc sur le piédroit puis sur le fond du garage.

Zone pouvant entraîner un choc direct sur le fond du garage



Zone pouvant entraîner un choc sur piédroit puis sur le fond du garage

Zone ne présentant pas de risque supplémentaire

Ainsi le calcul de l'indice de risque Cd se traduit de la manière suivante :

1/ Pour le mur du fond de garage, obstacle perpendiculaire à la route :

$$Cd = \min (P / \tan 20^\circ, L)$$

2/ Pour le piédroit susceptible de guider le véhicule vers un choc frontal sur l'obstacle perpendiculaire (n'est possible que si $L > P / \tan 20^\circ$).

$$Cd = L - P / \tan 20^\circ$$

Cette distance peut être écartée par la distance d'arrêt du véhicule suite à un freinage d'urgence à partir du point d'impact sur le piédroit.

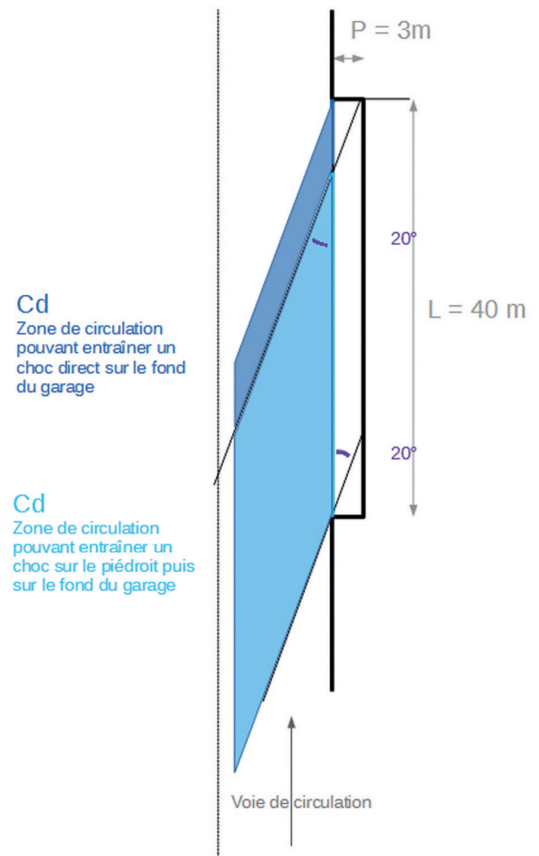
Le graphe ci-dessous permet de définir le Cd correspondant au piédroit d'un obstacle.

Les fonctions numériques définissant le graphe ci-dessous sont détaillées à la fin de cette annexe.

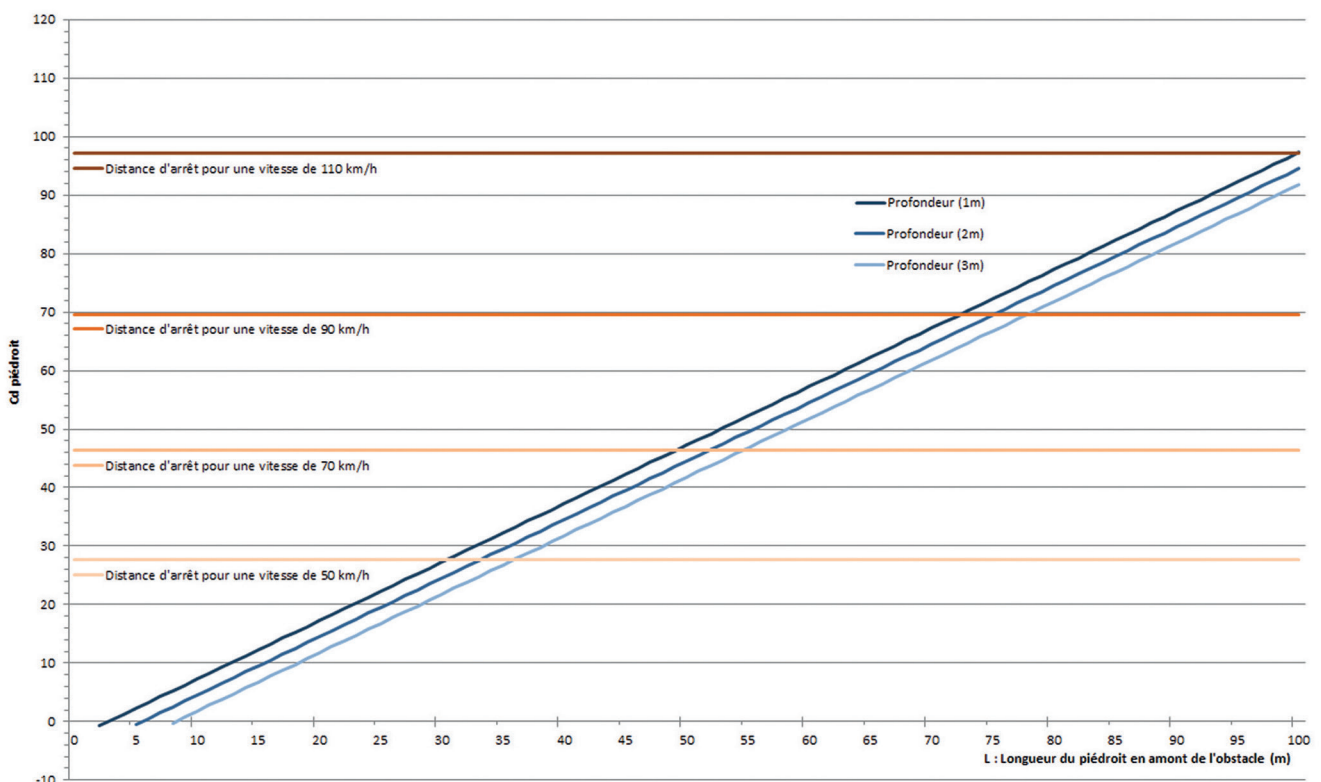
Les deux calculs de Cd ci-dessous ne peuvent pas être ajoutés pour créer un Cd global car les deux éléments pris en compte (obstacle lui-même, piédroit en amont de l'obstacle) impliquent des modifications pour les autres coefficients :

- dans le premier cas, l'obstacle est situé à moins de 1,5 m de la chaussée → $Ce = 3,5$;
- dans le deuxième cas, l'obstacle est situé entre 2,5 et 4 m de la chaussée → $Ce = 1,5$.

L'application de ce graphe ainsi que le calcul des Cd « mur du fond » du garage et Cd « piédroit » du garage sont détaillés dans l'exemple au paragraphe 6.4.1 « Garage situé en ligne droite ».



Cd du piédroit situé en amont d'un obstacle pour un temps de réaction de 1 seconde



5.2.2 Garage avec mur du fond incliné

Lorsque le mur du fond du garage est incliné, le calcul de l'indice de risque se décompose de la manière suivante :

Pour la partie inclinée :

$$Cd = P / \tan(\beta) + P / \tan(20^\circ)$$

Ce Cd est associé :

- à un Ce égal à 3,5 du fait que le point le plus proche de la chaussée soit situé à moins de 1,5 m ;
- à un Ca calculé en fonction de l'angle β .

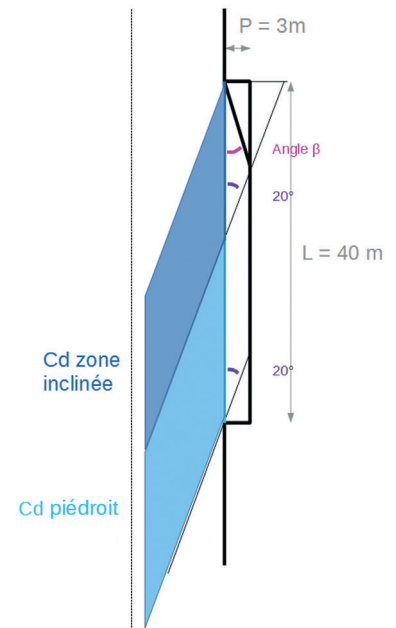
Pour le piédroit susceptible de guider le véhicule sur l'obstacle :

$$Cd = L - Cd \text{ (partie inclinée)}$$

Ce Cd est associé :

- à un Ce égal à 1,5 si le point le plus proche de la chaussée est situé entre 2,5 et 4 m ;
- à un Ca pris égal au Ca de l'obstacle vers lequel est dirigé le véhicule, c'est-à-dire le Ca de la partie inclinée.

Un exemple de calcul avec un garage situé en ligne droite est donné au paragraphe 6.4.1.



5.3 FORMULE DE CALCUL RETENUE DANS LE CADRE DES TUNNELS

Le danger que représente un obstacle donné sera donc défini de la manière suivante lorsque celui-ci se situe en tunnel :

$$IR = Cs * Cp * Ce * Ca * Cd$$

IR Indice de risque

Cs Coefficient lié aux sorties de chaussée

Cp Coefficient lié au tracé en plan

Ce Coefficient lié à l'éloignement de l'obstacle

Ca Coefficient lié à l'agressivité de l'obstacle

Cd Coefficient lié à la dimension de l'obstacle en tunnel

Dans le cas particulier des garages, l'indice de risque du garage sera égal à l'indice de risque du mur du fond du garage augmenté de l'indice de risque du piédroit susceptible de guider le véhicule vers un choc frontal sur le mur du fond du garage (un exemple de calcul avec un garage situé en ligne droite est donné au paragraphe 6.4.1.).

5.4 EXEMPLES D'APPLICATION DU CALCUL DE L'INDICE DE RISQUE

5.4.1 Garage situé en ligne droite

Pour un garage de 3 m de profondeur et de 40 m de longueur, situé en ligne droite dans un tunnel de 2 km dont le nombre d'accidents corporels par an s'élève à 4 :

Calcul de l'indice de risque du mur du fond du garage :

Cs = 2 pour 4 accidents corporels / an / 2 km

Cp = 1 en alignement droit

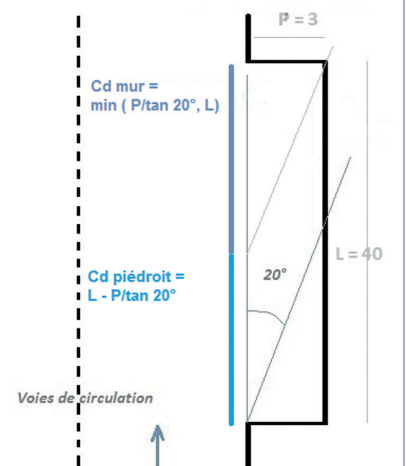
Ce = 3,5 obstacle situé à moins de 1,5 m

Ca = 30 pour les arbres et piédroits de tunnel

Cd = 8,2 $\min(3 / \tan 20^\circ, 40) = 8,2$

$$IR \text{ mur} = Cs * Cp * Ce * Ca * Cd$$

$$IR \text{ mur} = 1\,722$$



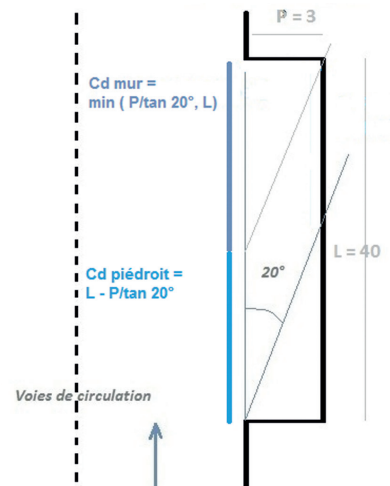
Pour un garage de 3 m de profondeur et de 40 m de longueur situé en ligne droite dans un tunnel de 2 km dont le nombre d'accidents corporels par an s'élève à 4 et dont la vitesse limite autorisée est de 70 km/h :

Calcul de l'indice de risque du piédroit du garage :

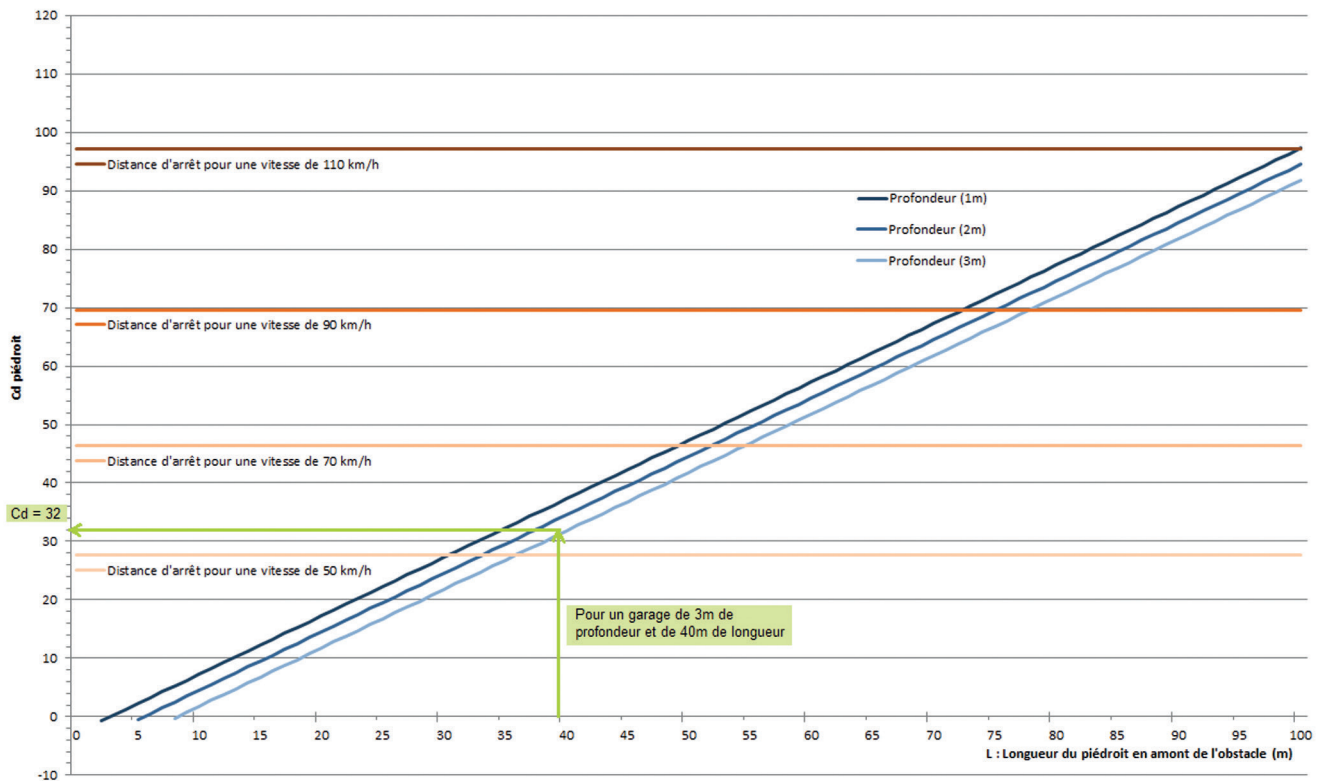
- Cs = 2 pour 4 accidents corporels / an / 2 km
- Cp = 1 en alignement droit
- Ce = 1 obstacle situé entre 2,5 et 4 m
- Ca = 30 pour les arbres et piédroits de tunnel
- Cd = 32 voir graphe ci-dessous permettant de calculer le Cd du piédroit

$$IR_{mur} = Cs * Cp * Ce * Ca * Cd$$

IR piédroit = 1 920



Cd du piédroit situé en amont d'un obstacle pour un temps de réaction de 1 seconde



Calcul de l'indice de risque du garage :

$$IR_{garage} = IR_{mur} + IR_{piédroit}$$

IR garage = 3 642

Calcul de l'indice de risque Cd :**Portion inclinée**

L'angle β entre cette portion de mur et l'axe du tunnel est de 15° .

$C_s = 2$ pour 4 accidents corporels / an / 2 km

$C_p = 1$ en alignement droit

$C_e = 3,5$ obstacle situé à moins de 1,5 m

$C_a = 1,52$ d'après le graphique en annexe 3

$C_d = 19,43$ $3 / \tan(\beta) + 3 / \tan(20^\circ)$

$$\text{IR mur} = C_s * C_p * C_e * C_a * C_d$$

$$\text{IR portion inclinée} = 288$$

Piédroit

$C_s = 2$ pour 4 accidents corporels / an / 2 km

$C_p = 1$ en alignement droit

$C_e = 1,5$ obstacle situé entre 2,5 et 4 m

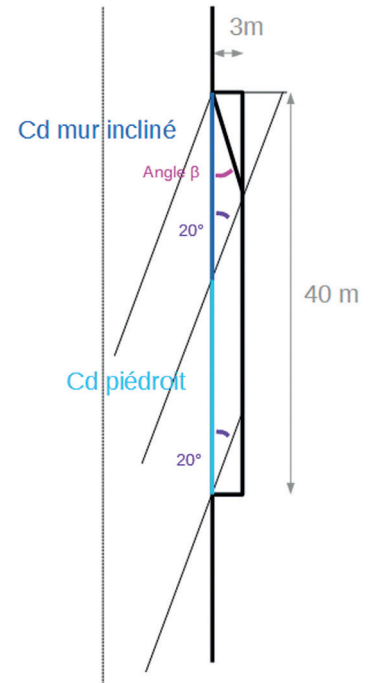
$C_a = 1,52$ égal au C_a de l'obstacle vers lequel conduit le piédroit (c'est-à-dire celui du mur incliné)

$C_d = 20,57 = 40 - 19,43$

$$\text{IR mur} = C_s * C_p * C_e * C_a * C_d$$

$$\text{IR piédroit} = 93$$

$$\text{IR mur du fond} = 381$$

**5.4.2 Intertube situé en ligne droite**

Pour un intertube de 25 m de profondeur et de 6 m de largeur, situé en ligne droite dans un tunnel de 2 km dont le nombre d'accidents corporels par an s'élève à 4 :

$C_s = 2$ pour 4 accidents corporels / an / 2 km

$C_p = 1$ en alignement droit

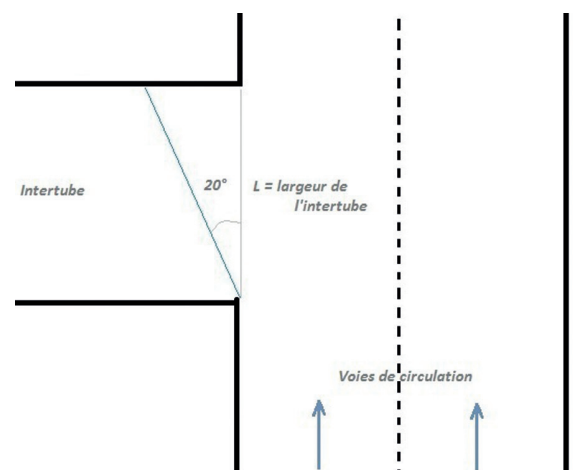
$C_e = 3,5$ obstacle situé à moins de 1,5 m

$C_a = 30$ pour les arbres et piédroits de tunnel

$C_d = 6$ $\min(25 / \tan 20^\circ, 6) = 6$

$$\text{IR} = C_s * C_p * C_e * C_a * C_d$$

$$\text{IR} = 1\ 260$$



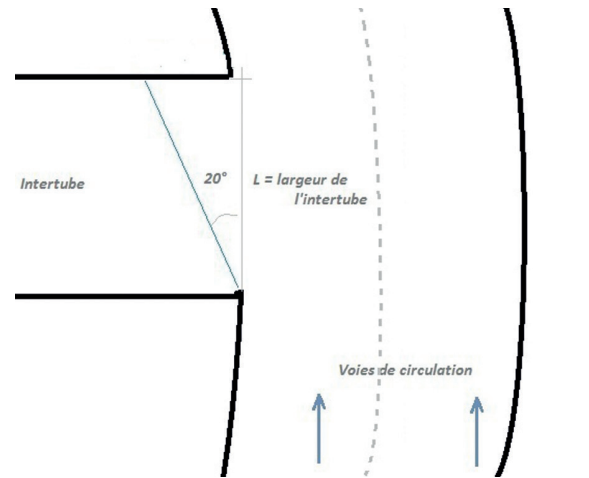
5.4.3 Intertube situé en courbe, côté intérieur

Pour un intertube de 25 m de profondeur et de 6 m de largeur, situé en courbe, côté intérieur, dans un tunnel de 2 km dont le nombre d'accidents corporels par an s'élève à 4 :

- Cs = 2 pour 4 accidents corporels / an / 2 km
- Cp = 5 en alignement droit
- Ce = 3,5 obstacle situé à moins de 1,5 m
- Ca = 30 pour les arbres et piédroits de tunnel
- Cd = 6 $\min(25 / \tan 20^\circ, 6) = 6$

$$IR = Cs * Cp * Ce * Ca * Cd$$

$$IR = 6\ 300$$



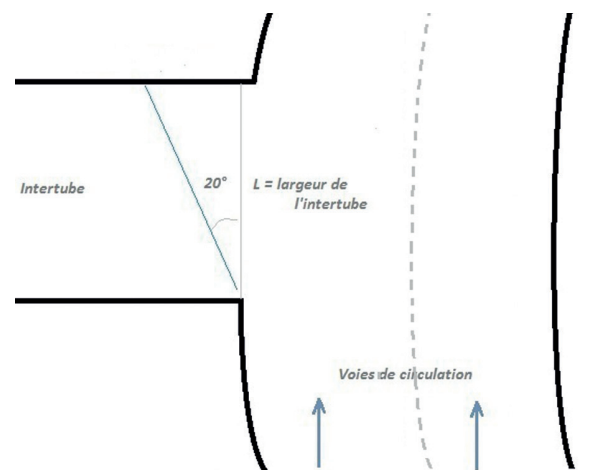
5.4.4 Intertube situé en courbe, côté extérieur

Pour un intertube de 25 m de profondeur et de 6 m de largeur, situé en courbe, côté extérieur, dans un tunnel de 2 km dont le nombre d'accidents corporels par an s'élève à 4 :

- Cs = 2 pour 4 accidents corporels / an / 2 km
- Cp = 10 en alignement droit
- Ce = 3,5 obstacle situé à moins de 3,5 m
- Ca = 30 pour les arbres et piédroits de tunnel
- Cd = 6 $\min(25 / \tan 20^\circ, 6) = 6$

$$IR = Cs * Cp * Ce * Ca * Cd$$

$$IR = 12\ 600$$



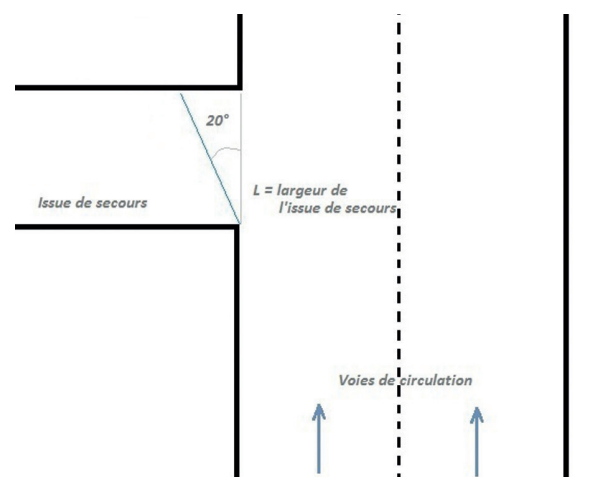
5.4.5 Issue de secours

Pour une issue de secours de 1,40 m de largeur, située en ligne droite dans un tunnel de 2 km dont le nombre d'accidents corporels par an s'élève à 4 :

- Cs = 2 pour 4 accidents corporels / an / 2 km
- Cp = 1 en alignement droit
- Ce = 3,5 obstacle situé à moins de 3,5 m
- Ca = 30 pour les arbres et piédroits de tunnel
- Cd = 1,4 1,40 m

$$IR = Cs * Cp * Ce * Ca * Cd$$

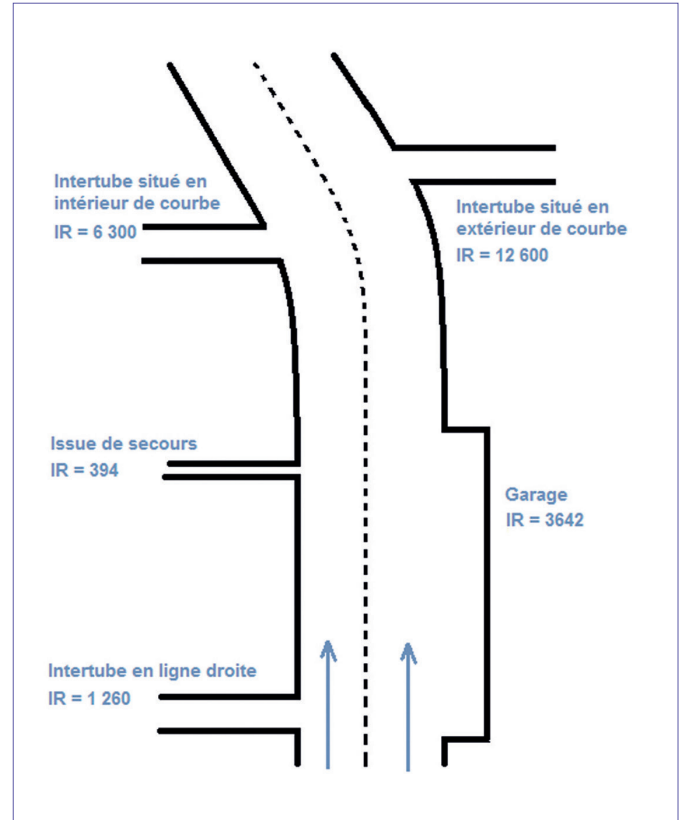
$$IR = 394$$



5.4.6 Synthèse des calculs d'IR

Ces calculs permettent de hiérarchiser les obstacles recensés dans un même ouvrage ou sur un itinéraire comportant plusieurs tunnels.

L'intertube situé en courbe extérieur présente ici l'indice de risque le plus élevé, il devra être étudié en priorité (voir exemple au paragraphe 3.4.2).



5.5 CALCUL DU CD DU PIÉDROIT

Méthode pour le calcul du Cd du piédroit en amont d'un obstacle

Définition du Cd « piédroit »

Le coefficient Cd « piédroit » est pris égal à la distance parcourue sur la voie de circulation pour laquelle une sortie de route prise avec un angle de 20° entraînera un choc sur le piédroit en amont de l'obstacle susceptible de guider le véhicule jusqu'à l'obstacle.

Le déroulement d'un accident sur le piédroit d'un garage ou en amont d'un changement de section peut se décomposer en 3 phases :

- impact du véhicule sur le piédroit ;
- phase de réaction du conducteur d'une durée de 1 seconde durant laquelle le véhicule continue d'avancer à sa vitesse initiale le long du piédroit ;
- phase de décélération du véhicule jusqu'à l'arrêt complet avant ou sur l'obstacle.

Données d'entrée

Les distances parcourues durant les deux phases de réaction et de décélération sont directement liées à la vitesse du véhicule, ainsi qu'à la nature du véhicule.

Les données d'entrée pour le calcul du coefficient Cd sont :

- le véhicule pris en compte est un véhicule léger ;
- la vitesse du véhicule sera prise égale à la vitesse limite autorisée dans l'ouvrage ;
- la vitesse de sortie du véhicule suite à son impact sur le piédroit est prise égale à la vitesse limite autorisée dans l'ouvrage ;
- le temps de réaction est considéré comme égal à 1 seconde ;
- la décélération prise en compte correspond à la décélération d'un véhicule léger en cas de freinage d'urgence sur chaussée sèche, elle est égale à 7 m/s².

Calcul de la distance parcourue pendant la phase de réaction (Dr) :

$$D_r = T_r * V$$

V vitesse maximale autorisée dans le tunnel

Tr temps de réaction = 1 seconde

Pour toute longueur d'obstacle L inférieure ou égale à cette distance Dr, l'usager n'aura pas le temps de réagir. Le coefficient de dimension Cd « piédroit » est donc égal à $L - P / \tan 20^\circ$.

Calcul de la distance d'arrêt (Da) :

$$D_a = V^2 / 2\gamma$$

$V^2 / 2\gamma$ représente la distance parcourue par le véhicule entre le moment où il commence à freiner et le moment où il s'arrête.

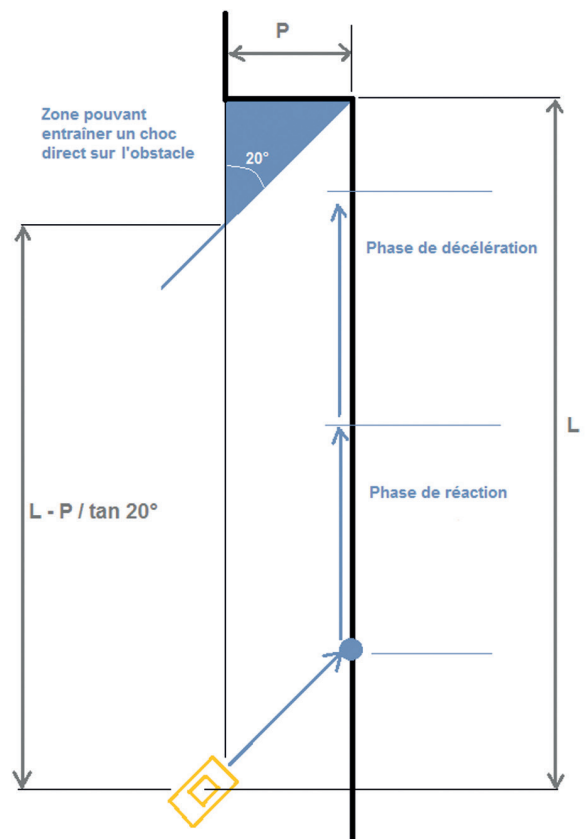
V vitesse maximale autorisée dans le tunnel

γ décélération = 7 m.s^{-2} sur chaussée sèche

Cette distance est indépendante de la géométrie de l'obstacle.

Il est ainsi possible de déterminer la portion du piédroit pour laquelle tout choc se transformera en un impact sur l'obstacle (représenté par le fond de garage, le changement de section, ...).

En amont de cette portion, le risque n'est pas augmenté puisque la phase de freinage est suffisamment longue pour permettre l'arrêt du véhicule.



Calcul de la distance pouvant entraîner un impact sur le piédroit (Dp) :

$$D_p = L - P / \tan 20^\circ$$

L longueur de l'ouverture pouvant entraîner un impact sur le piédroit puis une redirection vers l'obstacle constitué par le mur du fond

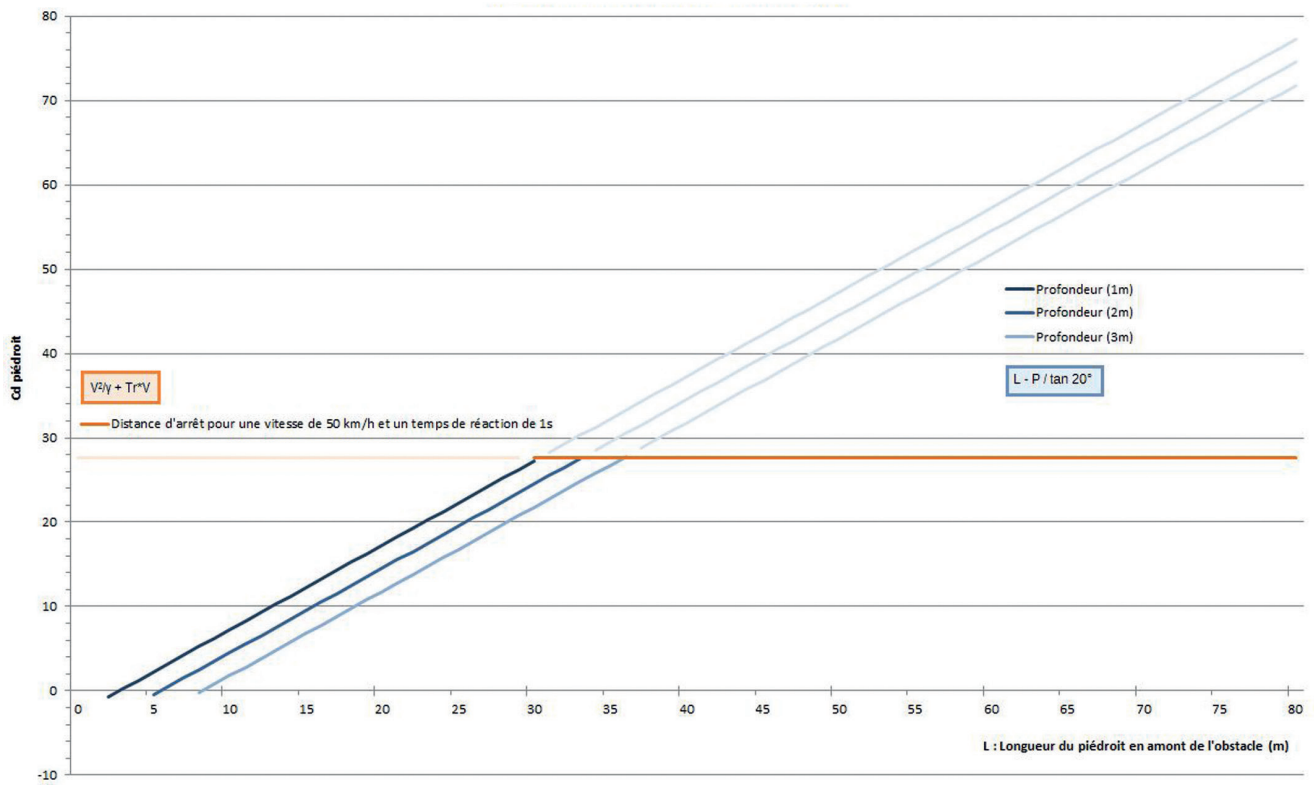
P profondeur de l'obstacle

Calcul du Cd « piédroit » en amont de l'obstacle :

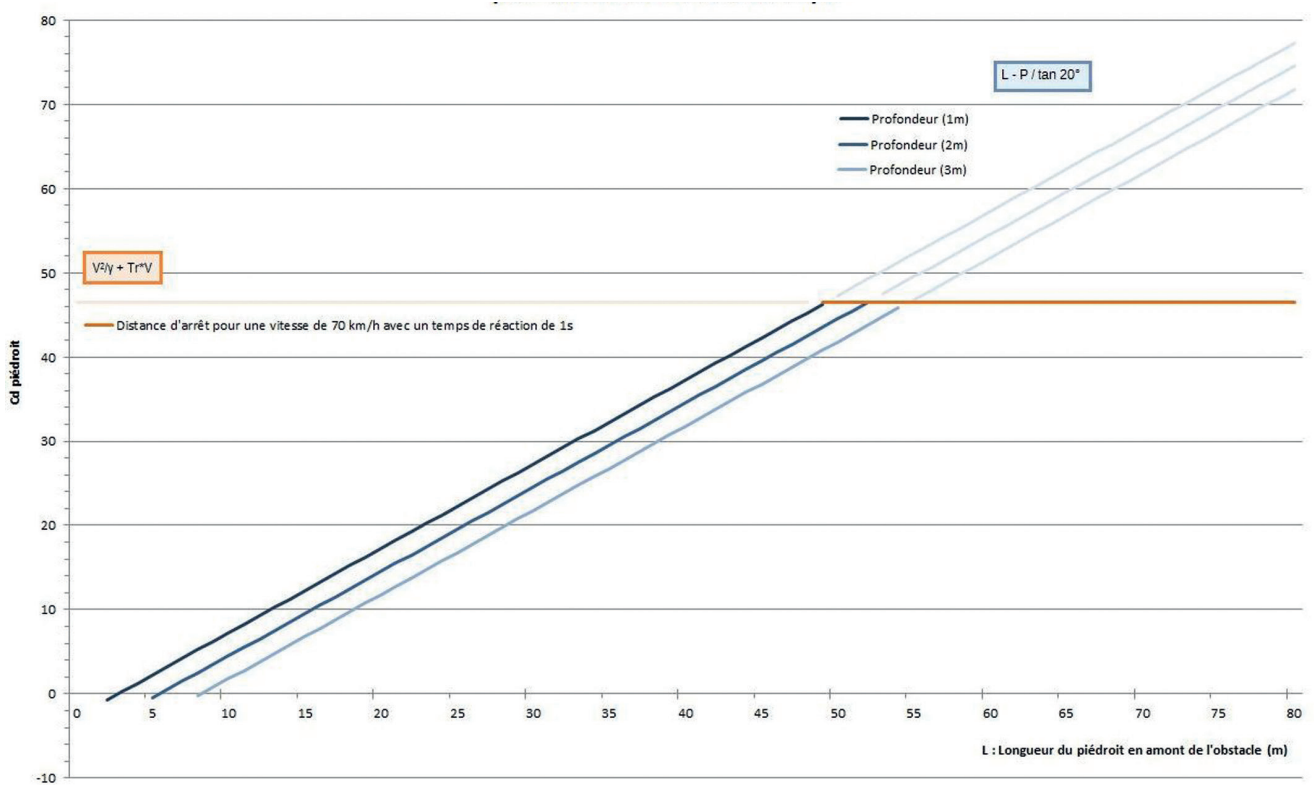
$$C_d = \min ((D_a + D_r), D_p) \\ = \min ((V^2 / 2\gamma + T_r * V), (L - P / \tan 20^\circ))$$

Le Cd « piédroit » est égal à la distance pouvant entraîner un impact sur le piédroit, limitée à la distance d'arrêt du véhicule du fait de son temps de réaction et de son freinage à partir du point d'impact.

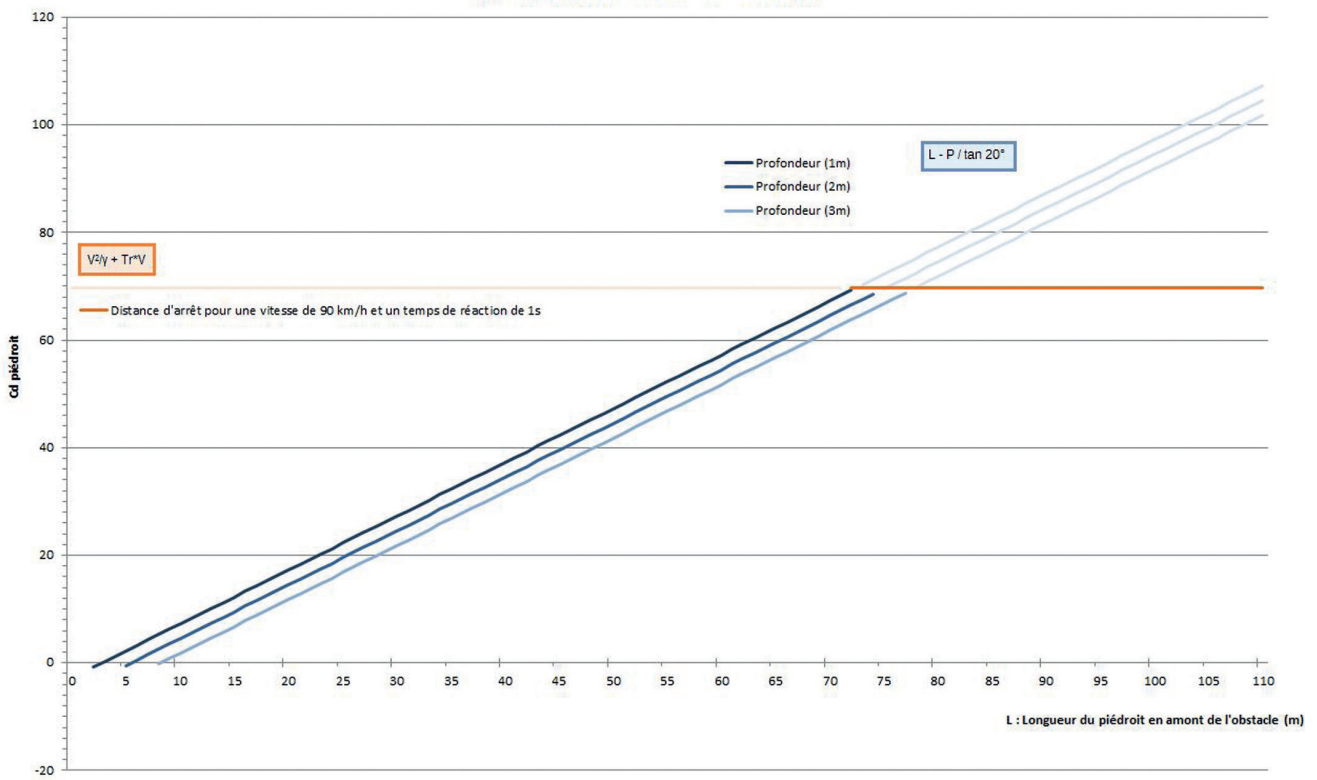
Cd du piédroit situé en amont d'un obstacle pour un tunnel limité à 50 km/h



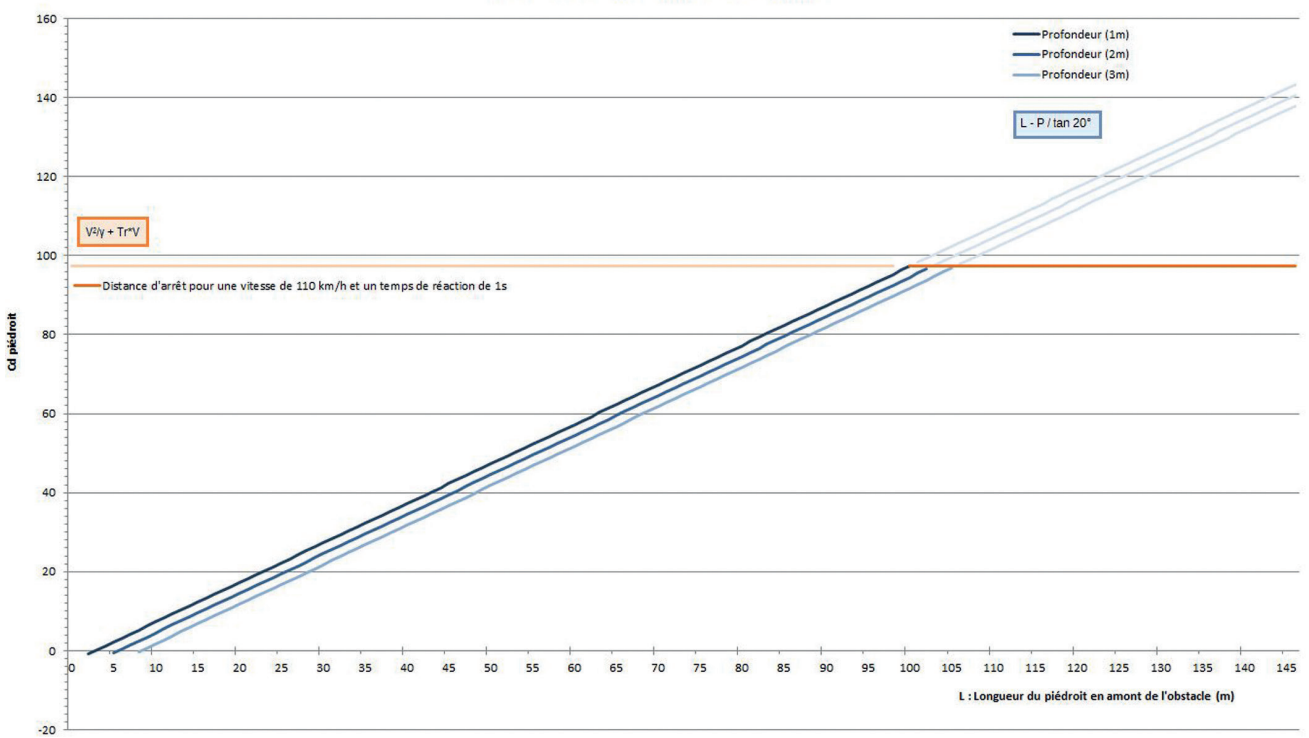
Cd du piédroit situé en amont d'un obstacle pour un tunnel limité à 70 km/h



Cd du piédroit situé en amont d'un obstacle pour un tunnel limité à 90 km/h



Cd du piédroit situé en amont d'un obstacle pour un tunnel limité à 110 km/h



BIBLIOGRAPHIE

- [1] Arrêté RNER - DRR (Réglementation Nationale des Équipements de la Route des dispositifs de retenue routiers) du 2 mars 2009 modifié par les arrêtés du 28 août 2014, du 3 décembre 2014 du 4 juillet 2019 et du 18 novembre 2021.
- [2] Norme NF EN 1317 de septembre 2010 relative aux dispositifs de retenue :
- partie 1 : Terminologie et dispositions générales pour les méthodes d'essai NF EN 1317-1.AFNOR, septembre 2010 ;
 - partie 2 : Classe de performance, critères d'acceptation des essais de choc et méthodes d'essai pour les barrières de sécurité incluant les barrières de bord d'ouvrage d'art. Norme NF EN 1317-2. AFNOR, septembre 2010 ;
 - partie 3 : Classe de performance, critères d'acceptation des essais de choc et méthodes d'essai pour les atténuateurs de choc. Norme NF EN 1317-3. AFNOR, septembre 2010.
- [3] *Traitement des obstacles latéraux sur les routes principales hors agglomération – Guide technique*, SETRA, édition 2002.
- [4] *Dispositifs de retenue en section courante*, CEREMA éditions, janvier 2022.
- [5] Arrêté du 14 janvier 2020 relatif à l'équipement des routes et autoroutes de dispositifs d'alerte sonore.
- [6] Instruction Interministérielle sur la Signalisation Routière (IISR) ; partie 1 ; Généralités.

CONTRIBUTEURS

Magalie ESCOFIER et Michaël POTIER ont participé à 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*

