

**XXIIIe CONGRÈS MONDIAL DE LA ROUTE  
PARIS 2007**

## **ESPAGNE - RAPPORT NATIONAL**

# **SCÉANCE D'ORIENTATION STRATÉGIQUE TS 3 SÉCURITÉ ROUTIÈRE ET EXPLOITATION**

Coordinateur : A. GARCIA GARAY  
aggaray@fomento.es

J.P. AGUILAR, R. LÓPEZ GUARGA, R. LLAMAS, A. SÁNCHEZ  
DGC Ministère des Travaux publics

E. BELDA  
DGT Ministère de l'Intérieur

J. DIEZ DE ULZURRUN, A. MUÑOZ  
Madrid Calle 30

J. M. PARDILLO MAYORA  
Université polytechnique de Madrid

O. GUTIERREZ-BOLIVAR  
Intevía, Groupe Elsamex

## **RÉSUMÉ :**

Le gouvernement espagnol a défini comme un de ses objectifs prioritaires l'amélioration de la sécurité routière, en tenant compte de l'engagement de l'UE de réduire de moitié le nombre de victimes mortelles par accident de la circulation en 2010 par rapport à 2002, et au quart en 2020. C'est pourquoi il faut agir énergiquement sur tous les facteurs influant sur la sécurité routière et concrètement sur les infrastructures routières. Ce rapport comprend quelques unes des initiatives les plus innovatrices et efficaces qui ont été développées en Espagne au cours de ces trois dernières années dans le but d'améliorer le réseau national routier. L'efficacité de l'exploitation des routes est étroitement liée à l'amélioration de la sécurité routière, et en particulier celle de l'exploitation des longs tunnels avec grande intensité du trafic. C'est pourquoi, nous avons considéré intéressant d'exposer les derniers progrès en systèmes de ventilation et d'extinction des incendies installés dans les tunnels de Madrid Calle 30 et de Monrepós, lesquels permettent de réagir rapidement à une éventuelle urgence pouvant avoir lieu à l'intérieur de ces grands tunnels.

### **1. INVESTISSEMENT EN INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES POUR AMÉLIORER LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE**

L'évolution du taux d'accidents sur le réseau routier espagnol ces dernières années est positive. En 1990, le nombre d'accidents avec victimes a commencé à diminuer, de sorte que le risque qu'il se produise un accident avec victimes sur les routes nationales a commencé à baisser progressivement à partir de 1989, l'indice de dangerosité passant de 40,3 cette année-là à 13,99 en 2004. Le nombre de victimes mortelles a également progressivement diminué ces dernières années, passant de 2 939 en 1991 à 1 463 en 2004, ce qui représente une diminution de 50,2 % en termes absolus, et de 72,1 % quant au risque de mortalité, puisque le taux de celle-ci (nombre de victimes mortelles par 100 millions de kilomètres parcourus) s'est réduit de 4,3 à 1,1. Il faut rappeler que l'Espagne se base sur les taux de dangerosité et de mortalité correspondant respectivement au nombre d'accidents avec victimes et de morts enregistrés par 100 millions de kilomètres parcourus, en mesurant par conséquent le risque d'avoir un accident ou de mourir en circulant sur les routes. Pendant les années 2004 et 2005, grâce à l'intensification de la politique d'amélioration de la sécurité routière sous toutes ses formes, on est arrivé à accentuer la tendance à la baisse des taux de dangerosité et de mortalité sur le réseau routier national comme le montrent les graphiques suivants.

## ÉVOLUTION DES TAUX DE DANGEROUSITÉ, DE MORTALITÉ ET DE GRAVITÉ SUR LE RÉSEAU CONVENTIONNEL

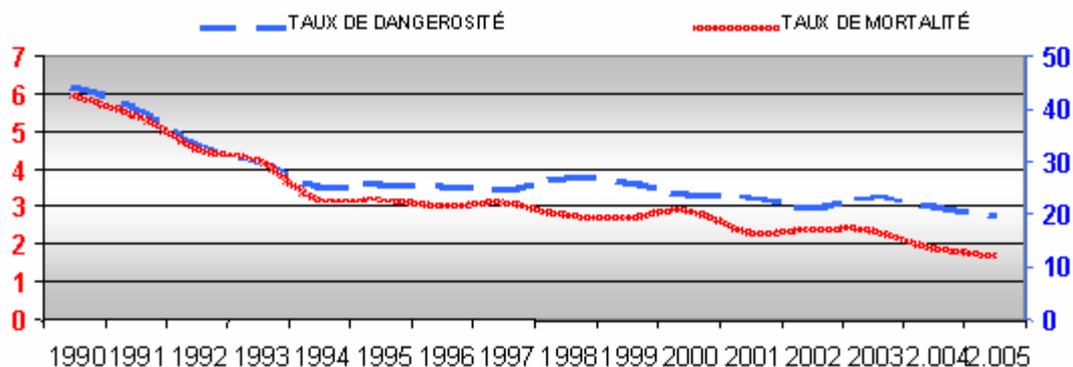


Figure 1 - Évolution des accidents sur les routes à deux voies

## ÉVOLUTION DES TAUX DE MORTALITÉ SUR LE RÉSEAU DE GRANDE CAPACITÉ

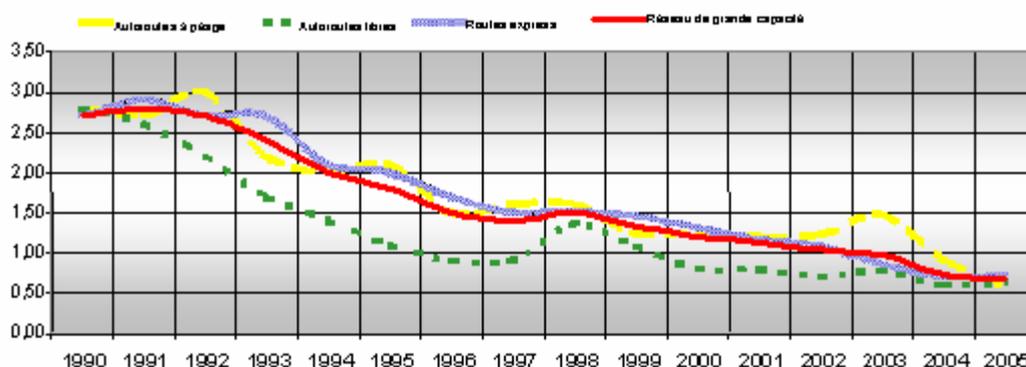


Figure 2 - Évolution des accidents sur les routes à 4 voies ou plus

### 1.1. Une stratégie intégrale d'investissements pour l'amélioration de la sécurité du réseau routier espagnol

La direction générale des Routes du ministère des Travaux publics espagnol s'est fixé comme objectif primordial de tous ses programmes l'amélioration de la sécurité routière sur le réseau qu'elle gère afin de respecter l'engagement du gouvernement de réduire de moitié le nombre de victimes mortelles des accidents de circulation en 2010 par rapport à 2002, et au quart en 2020, conformément au Plan stratégique des infrastructures et du transport en vigueur (PEIT). Afin d'atteindre cet objectif, une série de procédures ont été adoptées visant à la sécurité, depuis la conception même d'une route et pendant tout son temps de service, ce qui comprend les étapes de planification, de projet, de construction, de mise en service et d'entretien. Cette stratégie globale tente de répondre à tous les conditionnements dérivés du facteur humain, en projetant le tracé de la route de façon que les interactions entre l'environnement, la route et l'utilisateur se produisent avec le plus bas niveau de risques possible. Les phases de planification et de projet comprennent un système d'audits de sécurité routière indépendants du processus de conception. Dans ce système, une équipe indépendante d'experts en ingénierie routière et sécurité routière révisé la configuration des éléments physiques d'une route et ses interrelations, afin de

détecter les risques potentiels pour la sécurité des usagers et émettre des recommandations à l'équipe de planification ou de projet sur les mesures adéquates à prendre pour les éviter, avant d'arriver à l'étape de la construction. De plus, une analyse de l'état de la sécurité routière est en cours de réalisation sur les routes nationales en service afin de garantir que les caractéristiques de sécurité de chaque tronçon sont compatibles avec le classement fonctionnel de la voie et de détecter toute situation qui pourrait, avec le temps, devenir un problème de sécurité. Pour cela, 9 équipes d'experts ont révisé en 2006 l'infrastructure routière et son interrelation avec l'environnement, et rédigé les propositions d'amélioration correspondantes.

Finalement, l'Espagne réalise chaque année les programmes annuels d'amélioration de la sécurité sur les routes en service qui ont commencé en 1986. Ces programmes incluent un ensemble d'actions destinées à trouver des solutions pour les tronçons à concentration d'accidents (définis plus loin) et à améliorer de façon préventive les conditions de sécurité routière, en résolvant les carences fonctionnelles détectées afin de réduire le risque potentiel d'accidents sur l'ensemble du réseau.

## 1.2. Actions préventives et peu coûteuses du programme de sécurité routière

Les facteurs les plus importants relatifs à la réduction des accidents sur le réseau national routier ces 10 dernières années a probablement été l'entrée en service des nouvelles routes express et des variantes de villages, ainsi que la réalisation dudit programme annuel de sécurité routière, dont les objectifs sont les suivants :

- 1er étudier les tronçons à concentration d'accidents ;
- 2e réduire de façon préventive les zones de conflit potentiel, qui se situent principalement aux intersections et sur les échangeurs, dans les traverses d'agglomération, les zones périphériques d'une ville et les tronçons avec passages d'animaux, les passages à niveau, les tronçons à dépassement difficile, etc. ;
- 3e réaliser systématiquement l'analyse de l'état de sécurité routière de l'ensemble du réseau, qui sert de base à la définition des mesures préventives d'amélioration de la sécurité.

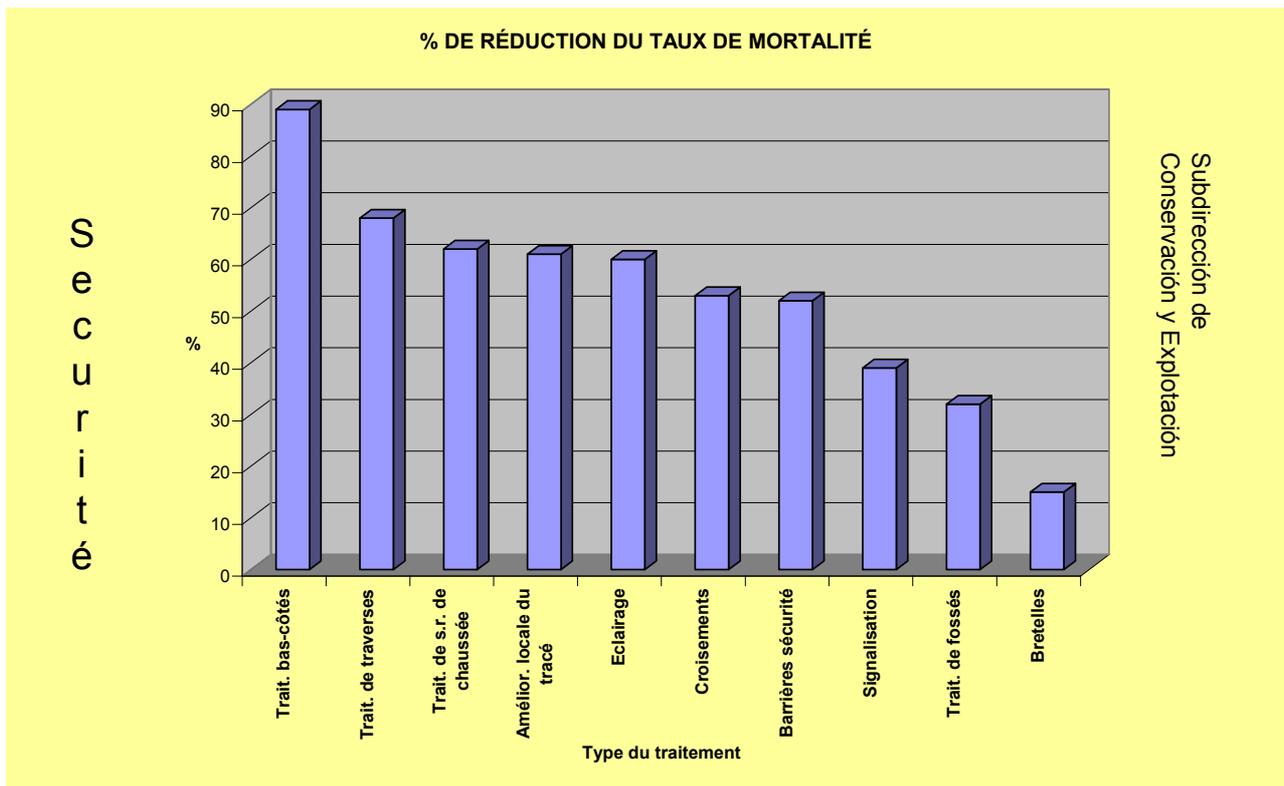
Le traitement des tronçons à concentration d'accidents comprend un ensemble d'actions très efficaces qui concernent un pourcentage du réseau d'environ 5 %, où se produisent 20 % des accidents avec victimes et 15 % des victimes mortelles. Annuellement, le ministère des Travaux publics identifie les tronçons à concentration d'accidents en tenant compte en plus des taux d'accidents enregistrés pendant une période de 5 ans, d'autres variables comme le débit moyen journalier (DMJ), le type de route et l'environnement (urbain, interurbain ou semi-urbain). Une fois ces tronçons identifiés, une étude détaillée de ceux-ci est faite par des ingénieurs spécialisés en sécurité routière, qui inspectent chacun de ces tronçons et réalisent une analyse et un diagnostic de sécurité qui débouchent sur les programmes d'action à entreprendre pour leur traitement et leur amélioration. Mise à part la grande efficacité des actions sur les tronçons à concentration d'accidents, il ne faut pas oublier que les autres 80 % d'accidents et 85 % de victimes mortelles se produisent sur le reste du réseau. C'est sur ces tronçons que se déroulent les actions préventives en vue d'éliminer les éléments de l'infrastructure potentiellement dangereux et d'homogénéiser les caractéristiques du réseau, afin de les améliorer avant que ne surviennent les accidents. L'étude de la réduction des taux d'accidents obtenue après la mise en service de 3 800 chantiers de sécurité routière réalisés dans le cadre des programmes de sécurité routière a permis de constater que la réduction moyenne du risque d'accident après coup est de 38 % et celle de la mortalité de 34 %.

De cette façon, le délai moyen de récupération du coût de l'investissement réalisé grâce à la réduction des coûts sociaux des accidents est de 2,5 ans, sans quantifier d'autres aspects comme l'amélioration de la capacité, la mobilité, l'économie de carburant, la diminution des temps de parcours, etc.

Pour ces études économiques du temps de récupération de l'investissement, l'évaluation des coûts sociaux des taux d'accidents a été de 150 000 € par victime mortelle, de 20 000 € par blessé grave et de 360 € par blessé léger. Parmi les travaux de sécurité routière inclus dans cette étude, les améliorations de signalisation sont celles qui ont donné la plus grande rentabilité puisqu'elles réduisent le risque de mortalité de 39 % et qu'elles sont amorties en moins de 2,5 mois (rapport bénéfice-coût = 6,5). Les traitements des bas-côtés réduisent le risque de mortalité de 84 %. L'éclairage, les traitements des traverses d'agglomérations, les améliorations locales du tracé et les traitements de sécurité routière de la chaussée réduisent les indices de dangerosité et de mortalité de plus de 50 % et de 62 %, respectivement. Enfin les traitements des fossés ont réduit le risque de mortalité de 31 %. Par contre, le remplacement des intersections par des échangeurs sur les routes conventionnelles, malgré la réduction de la dangerosité de 41 % (c95 = 99 %), n'est en général pas justifié économiquement si on tient seulement compte des critères de sécurité routière, car le coût élevé de ces opérations, d'environ 1 200 000 €, fait que la période d'amortissement est beaucoup plus longue.



**Figure 3- Exemple d'action à bas coût pour l'amélioration du balisage à Murcie**



**Figure 4 - Efficacité des programmes d'action de sécurité**

Les analyses de l'état de la sécurité routière (AESV) sont plus importantes dans les zones de conflit potentiel qui, comme il a été dit antérieurement, se trouvent dans les intersections et les échangeurs, les traverses d'agglomération, les rétrécissements, les passages d'animaux, les passages à niveau, les tronçons à dépassement difficile, etc. Ces zones donnent lieu à une analyse des caractéristiques de l'itinéraire et des propositions d'actions nécessaires.

Le détail des aspects qui sont étudiés dans les analyses de l'état de sécurité routière est le suivant :

- a) Tracé en plan et de profil en long : adaptation des paramètres de conception aux caractéristiques du trafic et aux vitesses réelles de circulation, et des distances de visibilité aux vitesses réelles de circulation. L'étude porte sur la consistance du tracé : variations de vitesse spécifique entre les éléments successifs, longueur suffisante des opportunités de dépassement (sur les routes à deux voies), et traitement adéquat des transitions entre les tronçons contigus.
- b) Section transversale : adaptation aux caractéristiques du trafic et à l'environnement, attention portée aux variations tout au long du tronçon et transition entre les tronçons contigus.
- c) Pavement et drainage : adaptation aux caractéristiques du trafic, de l'environnement et de la situation géographique (climatologie).
- d) Équipement : étude de la clarté, de l'opportunité et de l'uniformité de la signalisation, de la continuité de la signalisation d'orientation, de la conformité du balisage et des échangeurs, et de l'éclairage.
- e) Traitement des éléments singuliers : étudier spécialement les échangeurs, les traverses d'agglomération, les tunnels et les travaux d'amélioration, en tenant compte de la lisibilité, de la visibilité, des angles de croisement et de la canalisation des mouvements de tous les usagers.

- f) Prévention des effets de la fatigue : moyennant l'étude des éléments d'alerte et des zones de repos.
- g) Emplacement et conformité des accès.
- h) Bas-côtés : traitement des obstacles et des systèmes de contention dans les bas-côtés, y compris ceux correspondant aux éléments de la route : fossés, travaux de drainage, supports de structures, supports de signalisation, poteaux d'éclairage, talus, etc.
- i) Étude des flux : piétons et cyclistes.
- l) Sécurité des poids lourds, tant dans les rampes que dans les échangeurs.
- m) Analyse de la formation des queues dans les voies d'entrée et de sortie ou dans les intersections, et conformité des mesures prises.
- n) Stationnement des véhicules : emplacements et disposition des points d'arrêt des véhicules de transport public et accès pour les véhicules d'urgence.

### 1.3. Actions spécifiques pour l'amélioration de la sécurité routière des motocyclistes

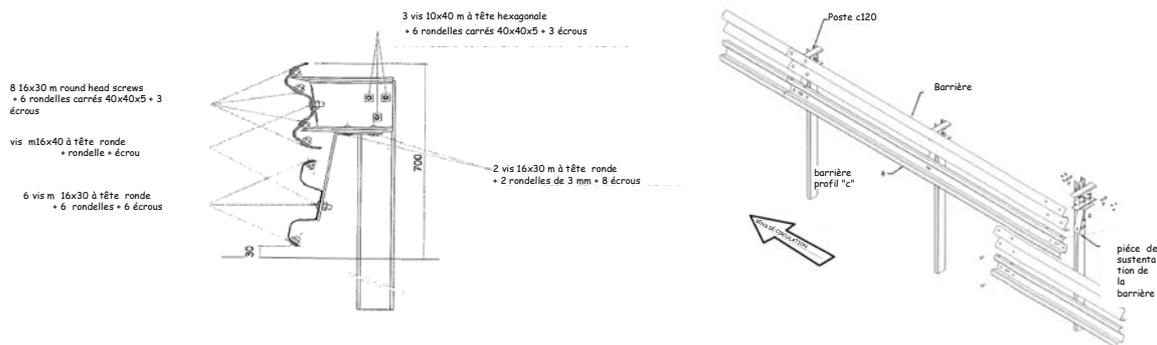
L'installation de dispositifs de contention de véhicules s'effectue dans les endroits où la gravité de l'accident contre l'obstacle à protéger serait beaucoup plus grande que les conséquences du choc contre la barrière. En Espagne, les règlements et les dispositions techniques en matière de systèmes de contention pour améliorer la sécurité des véhicules sont définis dans l'Ordre Circulaire 321/95 T et P « Recommandations sur les systèmes de contention de véhicules ». Selon l'étude sur les taux d'accidents en fonction de ces systèmes effectuée par la Direction générale des routes, la gravité des accidents est plus grande dans les tronçons où il n'existe pas de barrière de sécurité, la proportion pouvant atteindre le double sur les autoroutes et routes express. Et ceci malgré que ces systèmes de contention soient installés précisément dans des endroits potentiellement plus dangereux. Les études d'efficacité de ces dispositifs démontrent également que leur installation arrive à diminuer la gravité des accidents (accidents mortels pour 100 accidents avec victimes) d'environ 30 %. Cependant, tandis que les barrières ont démontré qu'elles étaient capables dans beaucoup de cas de canaliser la trajectoire de sortie ou d'invasion des automobiles et de la ramener à nouveau sur la chaussée, dans le cas des usagers des véhicules à deux roues, elles se sont révélées particulièrement agressives.

C'est pourquoi on a essayé peu à peu d'améliorer la conception de ces systèmes de contention dans le but de minimiser le dommage aux motocyclistes. Pour la période 1999-2003, les accidents de motos ont représenté 12 % des accidents avec victimes survenus sur le réseau routier national espagnol, et les accidents de motocyclettes dus à des sorties de la route ont signifié 2,4 % du total des accidents avec victimes. La réglementation espagnole, conforme aux directives provenant de la Commission européenne de normalisation, prévoit l'utilisation de profils "C" sur les routes express et de poteaux tubulaires sur les routes conventionnelles, ce qui évite, lors d'un choc d'un motocycliste contre une barrière, des blessures par coupure, d'où une amélioration par rapport aux antérieurs profils en "I" des barrières. Cependant, bien que la pose de nouvelles barrières métalliques de sécurité ou la réparation de barrières endommagées par des accidents s'effectue toujours avec les nouveaux profils "C" ou les poteaux tubulaires, il existe encore une grande quantité de barrières avec les anciens profils "I" que l'on protège avec des dispositifs spéciaux pour amoindrir le possible impact d'un motocycliste.



**Figure 5 - Protection en caoutchouc recyclé N344. Nouvelle barrière de protection**

Cependant le progrès le plus important dans l'amélioration des barrières de sécurité pour la protection des motocyclistes a été l'introduction d'un nouveau modèle défini dans la OC 18/2004 sur les « Critères d'emploi de systèmes pour la protection des motocyclistes », laquelle, après la réalisation de nombreux essais, est entrée en vigueur le 10 janvier 2005 ; ce nouveau modèle intègre une seconde barrière métallique à la partie inférieure des barrières traditionnelles, comme le montre la figure ci-dessous.



**Figure 6 - Détail de la barrière de protection pour motocyclistes**

Ce système empêche les motocyclistes de passer par dessous la barrière et de heurter les poteaux, et cela ne gêne pas le reste des véhicules en cas d'un accident de ce type.

Pour la mise en place de ces protections, le ministère des Travaux publics a élaboré un Plan de mise en conformité des barrières qui prévoit un équipement continu de 1 505 km dans des zones à géométrie difficile du réseau routier national, ce qui signifie un investissement de 43 M€ sur une période de 6 ans.

#### 1.4. IITS. Panneaux de signalisation variable

La Direction générale de la Circulation routière du ministère de l'Intérieur (DGT) a étudié au début des années 1980 la gestion et le contrôle du trafic dans le but d'améliorer le service aux usagers de la route. Pour ce faire, elle a procédé à l'installation d'un ensemble d'équipements de haute technologie permettant d'attirer fortement l'attention du conducteur, pour que celui-ci puisse être informé ponctuellement des incidences de la circulation, comme par exemple des accidents, des travaux, des rétentions, des incidences météorologiques ou des recommandations d'itinéraires alternatifs. Cette

information doit être fournie sous forme précise, de façon continue et en temps réel, ce que facilite les panneaux de messages variables (désignés PMV ci-après). Actuellement, le nombre de PMV installés sur les 23 842 km de routes à grande circulation du réseau national dépasse 1 800 unités, concentrées dans les accès aux principales villes où le trafic est nettement plus élevé. Étant donné que l'intensité de la circulation où sont installés les PMV dépasse normalement 50 000 véhicules/jour, on peut affirmer que plus des trois quarts des conducteurs espagnols reçoivent au cours de leurs déplacements quotidiens une information par l'intermédiaire de ce type d'équipement. Ils utilisent la technologie des DEL (diode électroluminescente), élément émetteur de rayonnement monochromatique ; leurs caractéristiques ont évolué notablement depuis une structure à base de pixels bicolores ou multicolores jusqu'à un contrôle unitaire de DEL unicolore, en fonction des nécessités physiques et fonctionnelles requises. La DGT a contribué en élaborant et rédigeant la norme de définition nationale et a participé activement au niveau européen à la norme EN 12966, qui, à partir de son approbation en février 2005, constitue l'élément de base pour la définition des fonctions des nouveaux PMV. Les trois premières unités de ce type de panneau ont été installées à la fin de 2005 à La Couronne ; sur le périphérique de Murcie, à l'occasion du IIe Congrès national de sécurité routière, et à Málaga, coïncidant avec le Ve Congrès national et Ier latino-américain de Systèmes intelligents de transport. Signalons que les derniers PMV installés en Espagne possèdent de nouvelles caractéristiques intéressantes, parmi lesquelles on peut citer le concept d'intégration, la possibilité de prolonger l'écriture alphanumérique dans la zone graphique, l'autonomie du PMV en cas de panne du réseau électrique pendant 1 heure à pleine charge et le contrôle des heures de fonctionnement des plaques de visualisation afin de mesurer l'utilisation et le vieillissement des panneaux. En 2006, 110 nouvelles unités similaires, développées conformément à la norme européenne EN12966, seront installées dans des emplacements tels que les accès à Palma de Mallorca, le tronçon Salamanque-Tordesillas de la A-62, des routes express de Cantabrie et les accès à Málaga et à Murcie, ce qui constituera un des réseaux les plus importants actuellement en Europe de ce type de panneaux.

### 1.5. Stations météorologiques

Le premier projet d'installation de stations météorologiques pour routes (SEVAC) a commencé à être développé en Espagne en 1998. Depuis, un total de 113 stations a été installé sur les routes et autoroutes les plus importantes de la zone centre d'Espagne (avec une moyenne de 1 station tous les 10-15 kilomètres). Ces stations possèdent les capteurs appropriés permettant de détecter les phénomènes atmosphériques les plus importants pouvant influencer sur la sécurité de la conduite, comme le brouillard, le verglas, la neige, les vents violents et la pluie. Les bons résultats obtenus depuis le début du plan ont conduit à développer ce programme dans trois nouvelles zones à partir de l'année 2000 : la Galice, où la pluie, la neige et le brouillard sont les facteurs les plus importants, les accès aux Pyrénées (neige, verglas et pluie) et l'est espagnol : Albacete, Alicante et Valence (présence de brouillard et verglas, et chutes de neige peu fréquentes mais importantes). Actuellement, ce sont plus de 350 stations SEVAC installées, qui couvrent plus de 10 000 km de routes à grande circulation, où il existe un risque important de climatologie difficile. Comme complément aux SEVAC, des détecteurs de spires sont également installés dans le revêtement pour capter les données du trafic, comme l'intensité, la vitesse, le pourcentage de poids lourds, etc., ce qui permet de transmettre en temps réel des messages du genre : « BROUILLARD DENSE DANS XX KM, NEIGE DU PK XX AU PK YY » avec suffisamment d'avance pour que les conducteurs puissent prendre les décisions les plus appropriées. En plus de ces stations météorologiques, fondamentalement orientées à l'information à l'utilisateur, il existe un autre réseau

comprenant 97 stations fixes et 19 stations mobiles, qui sont utilisées pour la gestion des opérations de viabilité hivernale et qui, en plus des informations atmosphériques, captent au moyen d'une sonde dans la chaussée d'autres données nécessaires à l'entretien de la viabilité, comme la température de l'asphalte, le degré de salinité, la température estimée de congélation, le point de rosée, etc. Les données sont envoyées via GPRS en temps réel aux centres d'entretien intégral des routes, où, après consultation des chefs des services d'entretien de la Direction générale des routes, sont déclenchés les traitements préventifs ou curatifs d'extension des fondants à partir du moment où la température ambiante descend au-dessous de 2 °C et l'humidité ambiante est supérieure à 75 %.

Tout ceci permet d'intervenir sur la chaussée avant que celle-ci ne se trouve dans de mauvaises conditions de viabilité, et surtout d'éviter l'apparition de plaques de verglas sur le réseau routier national, dont les effets négatifs sur la sécurité routière sont tant à redouter.



**Figure 7 - Station météorologique pour la gestion de viabilité hivernale située à Lorca**

## **2. SYSTEMES DE VENTILATION ET D'EXTINCTION DES INCENDIES DANS LES TUNNELS**

La sécurité dans les tunnels est grandement conditionnée par les systèmes de ventilation et d'extinction des incendies. Nous présentons deux cas très différents l'un de l'autre, mais qui sont intéressants du point de vue de l'exploitation des tunnels. Le premier est un système de tunnels urbains de très grande longueur avec une intensité de trafic très élevée. Le second est une adaptation parfaitement réussie d'un tunnel existant pour qu'il soit conforme aux nouvelles exigences en matière de sécurité.

### **2.1. Tunnels urbains de Madrid Calle 30**

'Madrid Calle 30' est un grand projet qui consiste à transformer l'ancienne route express périphérique M-30 en une autoroute urbaine, dont une grande partie sera souterraine, ce qui éliminera la barrière existant entre le centre de Madrid et les autres districts qui

complètent la ville. Le tracé de cette autoroute urbaine permettra d'améliorer la fonctionnalité du réseau en diminuant les temps de déplacement et en créant de nouveaux espaces verts, en particulier la récupération de la rivière Manzanares qui est actuellement de difficile accès pour les Madrilènes.



**Figure 8 - Récupération de la rivière Manzanares**

La solution retenue pour atteindre ces objectifs comprend la mise sous terre de certaines parties de l'autoroute et la construction de plusieurs km de nouveaux tunnels. La longueur totale des tunnels, y compris les échangeurs, sera de 50 kilomètres et la distance continue la plus longue sous terre sera de 11,5 km. La plus grande partie des travaux s'effectuera au moyen de batardeaux, mais deux nouveaux tunnels parallèles de 3,8 km seront réalisés à l'aide de tunneliers de presque 16 mètres de diamètre. Le débit moyen journalier prévu pour l'autoroute urbaine Calle 30 est de 300 000 véhicules/jour et dans les tunnels on pense dépasser 100 000 véhicules par jour. Pour les responsables de la gestion des tunnels, le point fondamental est la diminution des incidences et, quand celles-ci se produisent, de pouvoir intervenir de la façon la plus efficace possible, en donnant priorité à la sécurité, mais en évitant dans la mesure du possible la congestion de la voie. Il a été nécessaire de réaliser une étude approfondie des systèmes de sécurité et d'améliorer considérablement les paramètres de conception que l'on utilise habituellement.

## 2.2. Quelques données

Les besoins en énergie pour alimenter l'ensemble des tunnels sont de 60 mégawatts provenant de 5 sous-stations électriques, avec un anneau redondant de moyenne tension de 15 kilovolts. De plus, de multiples sous-systèmes sont prévus pour garantir la sécurité dans les tunnels ; ils sont contrôlés à distance depuis un centre de contrôle des tunnels, lequel est doté d'un centre de secours additionnel permettant de prendre le relais en cas de panne du principal. Ces deux centres de contrôle seront physiquement reliés aux centres de mobilité de la police municipale de la mairie de Madrid, des pompiers et du SAMU (services médicaux d'urgence), ainsi qu'au centre de gestion de la Direction générale de la Circulation routière.

En raison de leur influence sur la sécurité en cas d'incendie, signalons les sous-systèmes suivants :

- le système de ventilation,
- le système de filtrage de l'air,
- l'extinction des incendies au moyen d'eau nébuleuse (water mist) à haute pression.

### 2.3. Système de ventilation

Le tracé des tunnels, où il existe de multiples échangeurs, fait que le système de ventilation projeté est transversal dans les tunnels du by-pass sud et longitudinal dans la zone de la rivière ; il est constitué de puits et d'accélérateurs avec renforcement en cas d'incendie, avec des extractions uniformément réparties. Ainsi, en cas d'incendie, le comportement aérodynamique des tunnels est homogène.

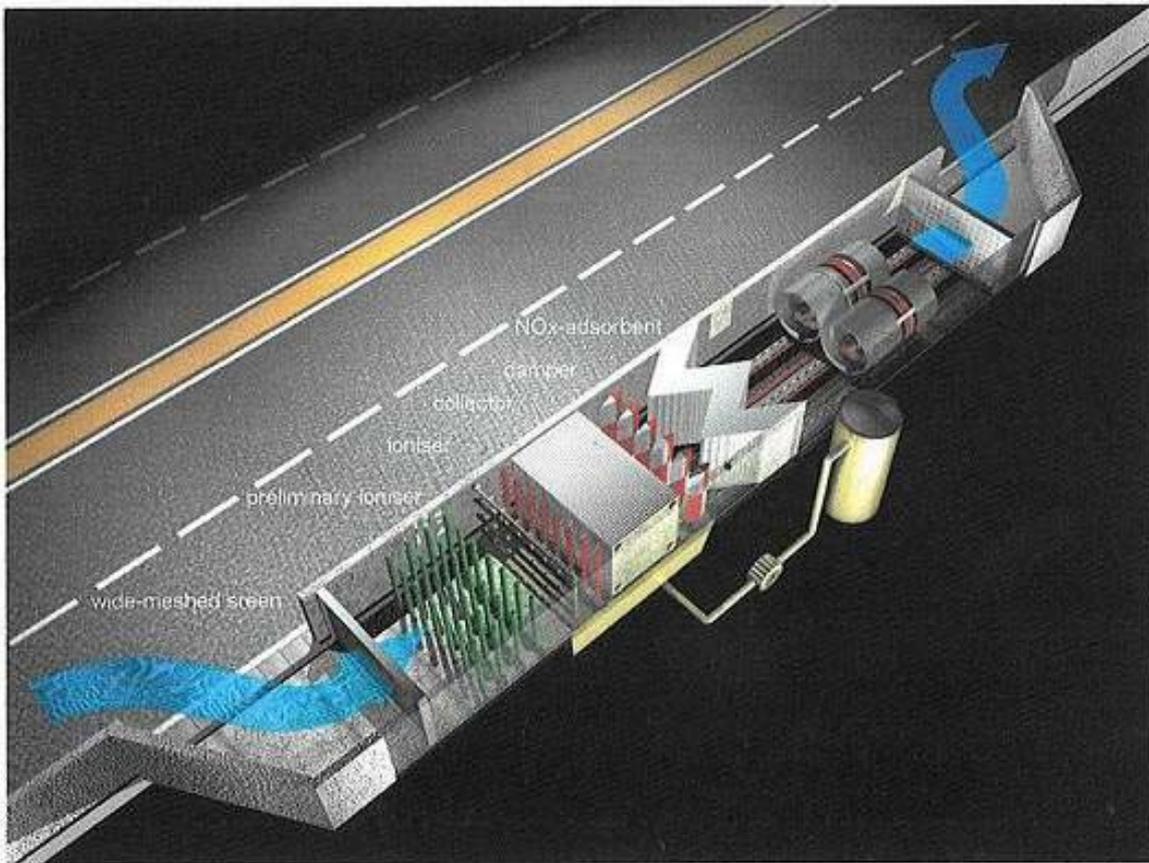
Ont collaboré à la conception l'université et les meilleures entreprises productrices de ventilateurs, de contrôle et de filtrage, avec pour résultat pour chaque tunnel des systèmes caractéristiques sûrs, robustes et fiables.

Les ventilateurs employés sont :

- ▶ 155 ventilateurs axiaux qui constituent le noyau de base du système de ventilation. Ils peuvent fonctionner en impulsion et/ou extraction avec une puissance totale de 43 340 MW.
- ▶ 451 ventilateurs longitudinaux ou à jets, qui seront distribués le long de certains segments du tunnel, pour définir le mouvement longitudinal de l'air à l'intérieur, avec une puissance totale de 11 747 MW.
- ▶ 258 ventilateurs d'extraction massive ponctuelle le long du tunnel, avec une puissance totale voisine de 5 MW.

### 2.4. Système de filtrage de l'air

Afin de réduire la contamination produite par l'extraction de l'air dans le tunnel, un total de 30 stations de filtrage de particules par précipitation électrostatique et de 4 stations de filtrage de NO<sub>2</sub> seront installés.



**Figure 9 - Système de filtrage**

## 2.5. Extinction des incendies au moyen d'eau nébuleuse (water mist)

Les stations de filtrage permettent d'obtenir de bons niveaux de qualité de l'air et d'éliminer les contaminants nocifs sans les expulser à l'extérieur ni nuire à l'environnement, puisque c'est le même air qui est pris dans le tunnel qui est renvoyé après filtrage et nettoyage.

L'eau nébuleuse, comme système de protection active, est considérée comme une des technologies les plus développées et les plus utiles dans le secteur de la protection dans les tunnels grâce à sa capacité de contrôle thermique dans la zone de feu et de réduction de la propagation du feu. L'efficacité extinctrice de l'eau nébuleuse est due à la haute pulvérisation de l'eau utilisée, ce qui optimise les effets de refroidissement, d'atténuation de la chaleur radiante et du déplacement de l'oxygène à la base du feu. La grande vitesse des gouttes compense leur faible masse au moment d'évaluer la quantité en mouvement, paramètre qui caractérise la capacité de pénétration de la goutte dans le panache de gaz chauds que produisent les flammes, et garantit que l'eau ne sera pas déplacée de l'emplacement du feu. Les particules créent, en suspension aux alentours du feu, un nuage humide et dense qui l'enveloppe et empêche ainsi son expansion, en réduisant l'importance des flammes et en éteignant le feu. L'obscurcissement produit par le brouillard atténue également la quantité de chaleur rayonnée.

Le principe d'extinction et de contrôle du feu de l'eau nébuleuse est basé sur trois actions différentes :

- refroidissement par absorption de la chaleur grâce à la vaporisation de l'eau,
- déplacement de l'oxygène dans le centre du feu grâce à la vaporisation,
- atténuation de la transmission de la chaleur par radiation.



**Figure 10 - Projection d'eau nébuleuse. Exemples de buses**

Le système d'eau nébuleuse se compose d'un équipement centralisé de pressurisation et de pompage qui alimente les buses de nébulisation d'eau à haute pression par un réseau de canalisations. Des essais réels ont été réalisés en collaboration avec le département d'extinction des incendies de la caserne de pompiers de Madrid, le CEMIM et les entreprises de fabrication dans le tunnel d'essai de San Pedro de Ares pour l'étude de la stratégie d'utilisation du système d'eau nébuleuse, lesquels confirment l'efficacité du système, bien qu'il reste à déterminer le moment optimal de déclenchement des buses de nébulisation.

## 2.6. Tunnel de Monrepós

Il s'agit du conditionnement d'un tunnel de 1 500 mètres de longueur ayant un trafic bidirectionnel non urbain se trouvant sur une route de grande importance qui communique une zone du nord-est de l'Espagne avec la France ; c'est un passage obligatoire pour le trafic transfrontalier qui passe également par un autre tunnel situé sur le même itinéraire, celui du Somport.

La très grande difficulté de construction de galeries d'échappement vers l'extérieur a conduit à mettre en place une série de mesures compensatrices de réduction de risques permettant d'améliorer la sécurité. Ce programme tient compte des futurs plans de dédoublement de la route actuelle qui prévoient la conversion des tunnels actuels en unidirectionnels, pour lesquels le système de ventilation idéal serait celui de type longitudinal.

Parmi les mesures prises dans cette première phase des améliorations prévues pour ce tunnel, il convient de signaler le renforcement du système de ventilation et la mise en place d'un système pour le contrôle automatique de la ventilation en cas d'incendie.



Figure 11 - Vue de la tête d'entrée

La capacité du système de ventilation longitudinal existant a été augmentée grâce à l'installation d'équipements plus puissants. L'objectif a été d'une part de disposer, dans le cas d'un incendie, d'une vitesse suffisante pour expulser les fumées par une des entrées du tunnel sans qu'elles reviennent en arrière, et d'autre part de permettre le contrôle du courant longitudinal, un point qui est critique pour la sécurité pendant les premières phases de l'incendie.

Le système de contrôle permet ainsi d'avoir des conditions de sécurité raisonnables, tant en service normal, qu'en cas d'incendie. Ceci est obtenu par deux méthodes :

- interventions automatiques directement sur la ventilation,
- aide à la prise de décisions pour le personnel d'exploitation du tunnel en lui proposant des actions qui permettent de réduire le temps final de réaction.

La philosophie générale d'intervention dans les deux cas est la même : maintenir les meilleures conditions d'évacuation possibles moyennant le maintien des conditions de stratification à partir du contrôle du courant longitudinal.

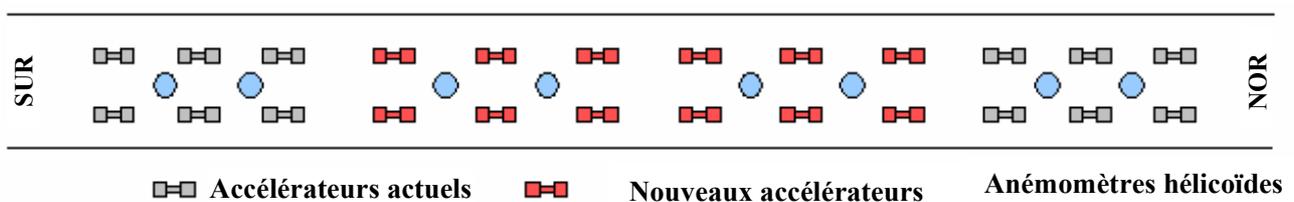


Figure 12 - Adaptation du système de ventilation

Le système de ventilation installé est de type longitudinal avec 24 accélérateurs de jets réversibles, suffisants pour couvrir la demande de débit d'air, en situation normale de service comme en cas d'incendie.

Le débit de ventilation de fonctionnement en service est le débit minimal d'air qui garantit dans chaque cas tant la dilution de contaminants jusqu'à des limites admissibles que la capacité de réponse du système de ventilation face à une demande rapide de débit pour chaque situation de service.

Des anémomètres et des systèmes de détection de contaminants (détecteurs de CO et opacimètres) ont été installés pour le contrôle de la ventilation.

Le dimensionnement en cas d'incendie tient compte de ce que le système de ventilation doit avoir la capacité suffisante pour entraîner le nuage de fumées jusqu'à l'une des entrées du tunnel, indépendamment du fait que, pendant les premiers instants de l'incendie, les stratégies de ventilation soient orientées à réduire la vitesse de l'air pour permettre l'évacuation des usagers dans les meilleures conditions de sécurité. La vitesse critique retenue pour le dimensionnement du système est légèrement inférieure à 3 m/s.

Les stratégies de ventilation dans ce cas sont basées sur le contrôle du courant longitudinal, permettant ainsi le contrôle des fumées.

Le système de ventilation est basé sur les objectifs suivants :

- Situation de service :
  - confort de l'utilisateur (niveaux de CO et opacité)
- Situation d'incendie :
  - contrôle du nuage de fumées
  - éviter l'extension de l'incendie
  - favoriser le sauvetage.

Dans le cas des tunnels de Monrepós, il existe un centre de contrôle avec présence humaine 24h/24h. En cas d'incendie, le système est préparé pour fonctionner manuellement ou automatiquement en fonction de la situation :

#### Phase 1 : Évacuation des usagers

L'objectif fondamental est de donner aux usagers le temps nécessaire à l'évacuation. Il est pour cela nécessaire de maintenir la stratification du nuage de fumées en maintenant une vitesse de l'air réduite, mais de toute façon inférieure à 2 m/s.

Le contrôle du courant longitudinal s'effectue en tenant compte des mesures de la vitesse de l'air dans l'intérieur du tunnel en activant ou désactivant les accélérateurs (en évitant toujours l'activation près du foyer).

#### Phase 2 : Expulsion des fumées

Lorsque l'on est sûr que l'évacuation totale des personnes est terminée, on procède manuellement à la mise en marche de tous les ventilateurs.

Pour vérifier la façon dont s'effectue la ventilation, des algorithmes ont été définis pour la contrôler selon les besoins.

Ainsi, la phase d'incendie comprend les sous-phases suivantes :

- pré-alerte : déclenchement des alarmes du système de détection linéaire ou des détecteurs de contaminants ;
- actions : séquence d'actions programmées : fermeture, renforcement de l'illumination et contrôle de ventilation ;
- réglage : compensation des déséquilibres observés ;
- expulsion : une fois le personnel évacué, intervention manuelle sur tous les ventilateurs.

Ce système offre des conditions raisonnables de sécurité. Bien que certaines opérations soient automatiques, d'autres dépendent du personnel d'exploitation comme la localisation du foyer ; certaines décisions, comme l'expulsion des fumées dans un sens ou dans l'autre, dont peuvent dépendre des vies humaines, ne doivent pas être prises automatiquement. Par contre, ce que fait le système, c'est de faciliter la prise de décisions en proposant des actions, ce qui diminue considérablement le temps de réaction.

Il a été ainsi possible d'adapter un tunnel existant aux nouvelles exigences de sécurité des tunnels.