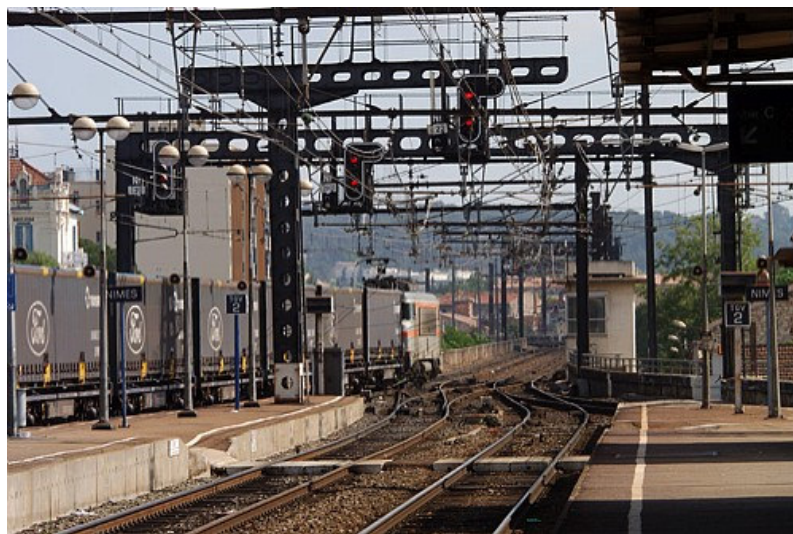


Février 2008



Gare de Nîmes

Bilan LOTI du contrôle de vitesse par balises (KVB)

Rapport

SOMMAIRE

Résumé et conclusions.....	5
1- Introduction	11
2- Historique du projet	13
2.1 Rappel des principales étapes.....	13
2.2 Les objectifs du projet.....	18
2.3 Les points sensibles du projet	18
3- Description de l'opération	21
3.1 Les principales caractéristiques du KVB.....	21
3.2 Les délais de mise en œuvre du KVB.....	24
3.3 Les évolutions du projet après la décision de faire	27
4- Les coûts et le financement	30
4.1 Le coût de l'investissement.....	30
4.2 Le coût de maintenance	34
5- L'amélioration de la sécurité	35
5.1 La fiabilité et la disponibilité	35
5.2 L'efficacité du KVB.....	36
6- Le bilan économique pour la collectivité	42
7- Remarques méthodologiques	46

Résumé et conclusions

Au cours des années 1980, la stabilité du nombre de franchissements de signaux d'arrêt fermés, l'augmentation du trafic attendu et la conviction qu'il serait impossible d'améliorer la sécurité uniquement par des moyens de formation ont conduit la SNCF à envisager l'installation d'un système de contrôle de vitesse.

Le développement de l'électronique embarquée offrait de plus de nouvelles possibilités. La SNCF a fait le choix d'assister le personnel au moyen de dispositifs réduisant les conséquences des erreurs humaines plutôt que d'automatiser. Cette utilisation du progrès technique et l'option de mettre en place des boucles de rattrapage caractérisent le grand choix technologique du contrôle de vitesse par balises (KVB), objet du présent bilan a posteriori (bilan LOTI).

En 1986, après deux accidents graves, la SNCF décide de tester le contrôle de vitesse qui équipait les chemins de fer suédois depuis 1981. Il fallait en effet rechercher des solutions de mises en œuvre les plus rapides possibles, donc des dispositifs opérationnels et adaptables sur l'ensemble des lignes et pas seulement sur quelques lignes nouvelles. Il s'agit d'un système de contrôle de la vitesse du train par balises et de visualisation en cabine d'informations d'aide à la conduite.

Après l'accident de la gare de Lyon (59 morts en 1988), la SNCF élabore un programme d'amélioration de la sécurité, approuvé par son conseil d'administration, qui retient au premier rang la mise en œuvre du contrôle de vitesse par balises (KVB).

Elle a mené une étude d'efficacité du système KVB en 1990, Cette étude a montré qu'il était possible de quantifier la sécurité et a permis de déterminer les signaux et les engins moteurs à équiper en première étape pour être le plus efficace possible : les carrés rouges¹ les plus sensibles sur les lignes classiques, ainsi que leurs annonces ; les voies en impasses sur les lignes les plus fréquentées ; les locomotives électriques.

A la suite de l'accident de Melun en 1991, la commission d'enquête ministérielle a confirmé les orientations du programme de sécurité de la SNCF, en particulier le développement des automatismes et du KVB. Les dispositions ont été prises pour accélérer la première étape en cours de réalisation (deux milliards de francs ou 305 M€ environ). La SNCF a également proposé aux pouvoirs publics une seconde étape prolongeant la première sur les lignes électrifiées et l'étendant aux locomotives diesel fréquentant régulièrement les lignes électrifiées (deux milliards de francs également).

De 1990 à 1995, la couverture du territoire par le KVB s'est poursuivie à un rythme soutenu. La fin des années 1990 coïncide avec l'achèvement progressif d'une étape significative en terme de sécurité ferroviaire qui aura vu se mettre en place le KVB.

En 1997, RFF est devenu propriétaire du réseau ferré national et maître d'ouvrage des opérations d'investissement sur cette infrastructure. Il a donc repris la maîtrise d'ouvrage du KVB sur l'infrastructure, en la déléguant à la SNCF qu'il a mandatée pour terminer le programme, et assure totalement le financement sur ses fonds propres.

¹ Le carré rouge est un signal d'arrêt absolu qui protège généralement un ou plusieurs aiguillages sur voie principale.

L'installation du KVB sur l'ensemble du réseau ferroviaire français a constitué un investissement très important estimé dès le départ à plus de 4 milliards de francs et a nécessité une planification rigoureuse. Compte tenu de l'ampleur de la tâche, l'équipement du réseau ferroviaire français et des engins moteurs a donc demandé 15 ans, la première étape s'étant achevée en 1995 et la seconde en 2006.

Par ailleurs, des études sont en cours (2007) pour améliorer les logiciels informatiques ou compléter l'équipement en KVB sur certaines lignes non électrifiées.

Dans le même temps, les autres chemins de fer européens se sont équipés de contrôle de vitesse, mais chacun avec leurs spécifications nationales. On compte actuellement une vingtaine de systèmes différents qui n'assurent pas l'interopérabilité. Le système européen ERTMS est le standard européen et arrive maintenant en phase opérationnelle. Son développement sur le réseau français sera progressif et impliquera une cohabitation avec le KVB pour les lignes conventionnelles.

Trois objectifs ont guidé le projet :

- améliorer la sécurité des circulations en évitant grâce à des dispositifs automatiques les situations les plus dangereuses de franchissements de signaux d'arrêt fermés (en premier lieu les carrés rouges) et de non-respect des limitations de vitesse ;
- rester transparent pour les conducteurs tant qu'ils respectent les règles de conduite (boucle de rattrapage qui n'est pas "de sécurité" pour des raisons de délais de mise en œuvre et de coût). La vigilance des conducteurs ne doit donc pas être affectée par le KVB. Le franchissement dangereux d'un signal d'arrêt fermé (avec engagement du point protégé) ne survient que si le conducteur et le KVB sont simultanément défaillants ;
- pouvoir équiper progressivement l'ensemble du réseau ferroviaire pour obtenir un maximum d'efficacité avec le minimum de signaux équipés.

L'inconvénient du KVB est qu'il diminue le débit des lignes de 10 à 15% dans les zones denses, car il est à transmission ponctuelle. Ceci impose au conducteur franchissant un signal d'avertissement fermé de régler sa vitesse pour s'arrêter avant le signal d'arrêt suivant, même si ce dernier s'est ouvert entre temps. Des contrôles de vitesse spécifiques plus onéreux aptes à gérer la réouverture des signaux ont ainsi dû être installés dans Paris sur deux courtes sections de lignes très chargées (KVBP (P pour prolongement) à transmission continue sur la partie parisienne de la ligne C du RER et KCVP compatible avec les rames RATP dans le tunnel entre Gare du Nord et Châtelet des lignes B et D du RER).

Le KVB réalise un contrôle automatique de la vitesse et du franchissement de certains signaux fermés à l'aide d'un calculateur embarqué sur les engins moteurs qui prend en compte les informations sur le mobile et sur la voie et les signaux. Lorsque la vitesse dépasse les limites prescrites, le KVB émet un signal sonore pour avertir le mécanicien et déclenche les opérations d'arrêt automatique en l'absence de correction.

La transmission du sol vers le bord est réalisée à l'aide de balises installées sur les zones équipées. La transmission est ponctuelle². Le système KVB est composé de deux sous-

² C'est-à-dire qu'elle n'est réalisée qu'en des points déterminés contrairement à la TVM (lignes à grande vitesse) ou au SACEM (ligne A du RER en Ile de France).

systèmes : le « sol » et le « bord » qui communiquent entre eux par une transmission électromagnétique :

- le sous-système « sol » transmet depuis le sol vers le train des informations sur la signalisation à respecter par la circulation et sur son état. Il utilise des installations fixes appelées **balises**, implantées dans l'axe de la voie ;
- le sous-système « bord » est constitué sur les engins moteurs d'une antenne recueillant les informations des balises, d'un calculateur qui reçoit les données de l'antenne et celles entrées via les panneaux de données, qui calcule les courbes de contrôle de la vitesse du train et qui informe le conducteur sur l'état de fonctionnement du système et d'un panneau de données qui transmet au calculateur les caractéristiques du mobile. Un panneau de visualisation réduit (afin de ne pas influencer le conducteur) informe en cabine du mode de fonctionnement du KVB.

Les délais étaient contraints par la gravité des accidents dès 1985. Le choix du dispositif existant sur les chemins de fer suédois permettait une mise en œuvre plus rapide et progressive moyennant quelques adaptations. C'est l'accident de Melun en 1991 qui a conduit les pouvoirs publics à accélérer la première étape alors en cours, qui devait être achevée en 1993 pour les signaux et en 1995 pour les engins, et à lancer une deuxième étape à partir de juin 1992. L'ensemble du réseau électrifié et des engins de ligne devait être équipé en 1998.

La première étape a été bien réalisée de 1991 à 1995. La seconde étape s'est terminée en 2006. L'équipement des engins moteurs est fait depuis 2002. Les nouveaux engins sont équipés d'origine et tous ceux circulant sur le réseau ferré national plus d'une heure par jour sur ligne équipée doivent être munis du KVB (arrêté ministériel du 1^{er} juillet 2004).

L'allongement des délais de réalisation de la seconde étape (15 ans au lieu de 6 ans) s'explique par les délais de la programmation et des études très importantes. Les deux étapes ont été menées de front comme un seul programme. Il était préférable d'équiper des zones complètes ou d'attendre l'occasion d'autres travaux.

Programme KVB réalisé

	Première étape (1991 1995)	Deuxième étape (1992 2006)	Programme total
Engins moteurs	3700	1888	5588
Signaux fixes	5000	11100	16100
Signaux de chantier	750	600	1350

Sources : SNCF RFF

Le KVB a évolué depuis les premières années.

La technologie d'origine analogique présente des inconvénients au sol : encombrement important et balises nombreuses, ce qui pose des problèmes d'implantation ; grand nombre de types de matériels, ce qui nécessite des stocks. Il est donc décidé, dès 1991, de lancer les études d'une nouvelle génération de matériel sol qui utilisera les performances de la technologie numérique et depuis 1996, le KVB sol-numérique est installé permettant une baisse des coûts avec un niveau de sécurité au moins équivalent. Le système KVB embarqué sachant lire et interpréter à la fois les messages du KVB analogique et du KVB numérique, il est possible d'avoir dans une même zone des signaux équipés de l'une ou l'autre technologie.

Avec la première mise en service apparut très vite la nécessité de faire un certain nombre d'évolutions fonctionnelles au niveau du logiciel. Un comité de version fut créé pour gérer les demandes d'évolution. La relative saturation des capacités du microprocesseur et l'apparition de nombreuses évolutions comme le passage à des balises numériques ont conduit à développer la version suivante du logiciel avec un autre microprocesseur. Le développement de cette version a été réalisé à l'aide des techniques mises en œuvre pour la conception de différents produits informatiques sensibles vis à vis de la sécurité et utilisées principalement dans le ferroviaire et l'aéronautique. Pour chaque version du logiciel, une importante procédure de qualification est mise en œuvre après la phase de validation pour l'industriel. Il faut compter de 9 à 12 mois de qualification pour une version de logiciel.

Les coûts d'investissement du KVB ont augmenté de +24% par rapport aux prévisions (**1041 M€₂₀₀₅** au lieu de 839 M€₂₀₀₅). L'écart s'explique par la hausse des coûts unitaires, liée à l'incertitude des évaluations initiales, légèrement compensée par un programme moins important.

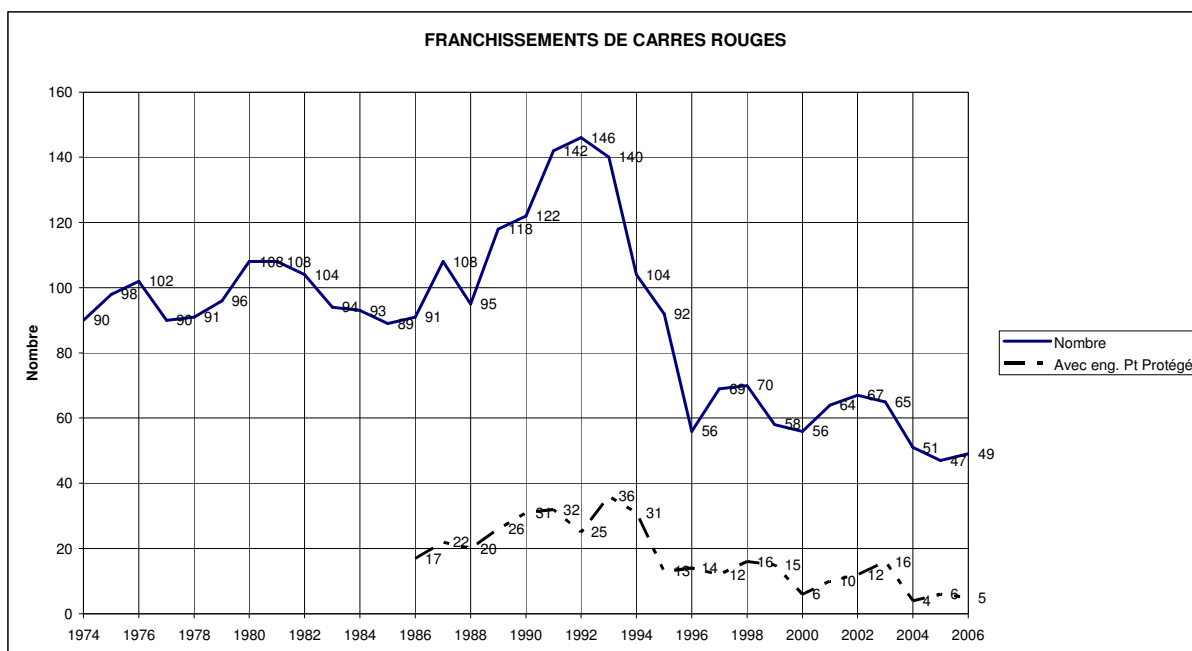
Les 3/4 de l'investissement ont été faits de 1990 à 1998. L'effort des premières années a été très important puisque de 1992 à 1996 le KVB a représenté environ le tiers des investissements de sécurité de la SNCF³. La SNCF a assuré jusqu'en 1997 la maîtrise d'ouvrage et le financement des équipements du KVB à bord et au sol sur ses fonds propres. Depuis cette date, RFF, propriétaire du réseau national, a repris cette mission pour l'infrastructure.

Les dépenses de maintenance peuvent être considérées comme proportionnelles aux nombres annuels cumulés d'engins ou de signaux équipés en KVB. Au total, les coûts de maintenance sont en 2006 de l'ordre de 2,1 M€₂₀₀₅ pour les engins moteurs et de 5,5 M€₂₀₀₅ pour les signaux.

Le niveau prévu de disponibilité du KVB est atteint pour les engins moteurs. En revanche, les objectifs retenus lors de la décision de déploiement ne sont pas encore atteints pour le sol. Des mesures correctives ont été décidées, comme le remplacement des séries de balises défailtantes.

Le KVB constitue bien un progrès en matière de sécurité. C'est une boucle de rattrapage conformément aux objectifs. Le nombre de franchissements de carrés rouges a baissé en moyenne de 39% et le nombre d'engagements du point protégé, qui représente le risque réel d'accident grave, de 53%. Aucun accident grave lié à un franchissement de carré n'a eu lieu depuis 1991.

³ Les investissements de sécurité sont assez difficiles à définir car ils ont souvent d'autres fonctions. En 1994, ils se partageaient entre 143,4 M€₂₀₀₅ pour le KVB (année la plus importante) et 239,0 M€₂₀₀₅ hors KVB.



Le TRI pour la collectivité est de l'ordre de 5,8% avec une valeur de la vie humaine épargnée de 15 M€ comme le propose la commission présidée par M. Boiteux en 1994⁴. Il est négatif avec la valeur du mort de 1,5 M€ retenue en France pour évaluer les projets de transports collectifs. Ce taux de rentabilité reste inférieur au seuil de rentabilité collective fixé à 8% par l'ex Commissariat du Plan pour les investissements publics au moment de la décision de réalisation⁵ (taux réels hors inflation).

La décision initiale de lancer la première étape du KVB n'a pas été prise sur la base d'une analyse socio économique explicitée. Cet investissement de sécurité a été décidé avec les pouvoirs publics après une série d'accidents graves dont l'éventualité d'une répétition a été considérée comme inacceptable à tous points de vue. Toutefois, les modalités de déploiement ont été engagées au vu des conclusions de l'étude d'efficacité du système menée par la SNCF en 1990, de même que le lancement des étapes suivantes.

La valeur implicite du mort évité par le KVB calculée a posteriori est de l'ordre de 8,1 M€₂₀₀₅, soit un peu plus de 5 fois la valeur tutélaire actuelle. Ces résultats sont conformes au constat que le coût du mort évité dans les secteurs aériens et ferroviaires est généralement beaucoup plus élevé que les valeurs tutélaire de la vie pratiquées dans les différents pays comparables, en particulier que celles retenues pour la sécurité routière. Certaines raisons justifient cet écart qui traduit une exigence de sécurité bien plus grande dans les transports collectifs que dans les transports individuels, comme l'effet de contexte (accidents de masse pour lesquels l'aversion du public et des décideurs est forte).

⁴ Le rapport du groupe du Plan présidé par M.Boiteux (1994) préconisait de compléter les études économiques par un calcul de sensibilité avec une valeur du mort dans les transports collectifs quinze fois supérieure à la valeur retenue pour la route, soit ici 15 M€.

⁵ Le rapport Lebègue du Plan (2005) a ramené ce seuil à 4% (sans les risques).

1- Introduction

Ce rapport constitue le bilan a posteriori du contrôle de vitesse par balises ou KVB⁶ mis en œuvre sur le réseau ferroviaire français. Il est établi conformément à l'article 14 de la loi d'orientation des transports intérieurs (LOTI) du 30 décembre 1982⁷ qui prévoit que les grands choix technologiques réalisés avec le concours de financements publics doivent faire l'objet d'un bilan des résultats économiques et sociaux, qui est rendu public.

Le KVB a été étudié et mis en place par la SNCF, maître d'ouvrage jusqu'à la création de RFF en 1997 et maître d'ouvrage délégué ensuite. La SNCF, en particulier la Direction de la Sécurité, a donc fourni l'essentiel des données nécessaires, comme pour les bilans LOTI des autres opérations réalisées avant 1997. Elle doit être remerciée pour son importante contribution à ce rapport.

En application de ces dispositions, le bilan du KVB a été lancé à la fin de 2004. Les travaux ont été réalisés par RFF, sous l'égide d'un comité de pilotage composé de l'administration de tutelle (Direction Générale de la Mer et des Transports, Conseil Général des Ponts et Chaussées), de RFF et de la SNCF. En outre, un comité scientifique a été mis en place par RFF pour veiller à la rigueur de la méthodologie utilisée.

Selon le décret d'application⁸, ce bilan a posteriori comporte une analyse des conditions et des coûts de constitution, d'entretien, d'exploitation et de renouvellement de l'équipement projeté, une analyse des conditions de financement ; les motifs pour lesquels, parmi les partis envisagés, le choix présenté a été retenu ; une analyse des incidences de ce choix sur les conditions de transports.

L'évaluation des grands choix technologiques comporte également une analyse des différentes données de nature à permettre de dégager un bilan des avantages et des inconvénients du choix retenu. Ce bilan comporte l'estimation d'un taux de rentabilité pour la collectivité calculé selon les usages des travaux de planification. Il tient compte des éléments qui ne sont pas inclus dans le coût des transports tels que la sécurité des personnes ou l'utilisation rationnelle de l'énergie, etc. Il peut être établi sur la base de grandeurs physiques ou monétaires.

L'objet est ainsi de porter une appréciation sur la réalisation de l'opération, son exploitation et ses effets, sur les écarts entre la réalité constatée et les prévisions, les causes de ces écarts, ainsi que sur l'efficacité, l'impact et donc in fine sur l'intérêt de l'opération réalisée.

En résumé, deux questions principales se posent :

- Le KVB constitue-t-il un progrès en matière de sécurité? Il faut noter que le principe de sûreté de fonctionnement GAME (globalement au moins équivalent) interdit toute installation ou modification d'un système qui détériorerait le niveau de sécurité global ferroviaire⁹.
- Ce progrès est-il suffisant par rapport au coût de l'équipement?

⁶ La lettre K est utilisée à la SNCF pour le mot « contrôle », la lettre C étant réservée au mot « commande ».

⁷ Loi n° 82-1153 du 30 décembre 1982 d'orientation des transports intérieurs

⁸ Article 12 du décret n°84-617 du 17 juillet 1984

⁹ Article 42 du décret n°2006-1279 du 19 octobre 2006 relatif à la sécurité des circulations ferroviaires

Les informations utilisées proviennent :

- des documents disponibles concernant la préparation du projet et la situation ex ante, notamment :
 - rapport de la commission d'experts chargée d'un audit sur les systèmes de sécurité de la SNCF (SNCF avril 1991),
 - sécurité du contrôle de vitesse par balises. Rapport et annexes (Délégation générale à la sécurité SNCF janvier 1991) ;
- des données et des notes fournies par la SNCF, en particulier par le Centre d'études de sécurité, et par RFF ;
- des travaux menés avec RFF et la SNCF ;
- des études ex post disponibles, comme les rapports d'activité et les rapports sur la sécurité des circulations de la SNCF depuis 1989, les rapports de RFF sur la gestion de la sécurité ou l'audit technique réalisé par la SNCF (janvier 2005) sur la fiabilité et la disponibilité du KVB.

Le bilan est réalisé pour la SNCF supposée encore intégrée comme dans les dossiers ex ante et ne distingue pas le transporteur et le gestionnaire d'infrastructure.

Un bilan LOTI est une évaluation de politique publique qui mesure les écarts entre la réalité constatée et les objectifs de départ et qui vise à en tirer les enseignements. Le lancement du KVB n'a pas donné lieu à une étude socio économique explicitée. C'est donc une étude prévisionnelle d'efficacité du système menée ex ante par la SNCF en 1990 pour optimiser les investissements au sol et à bord qui a été utilisée comme référentiel.

Le rapport comprend deux grandes parties.

Dans la première, des chapitres 1 à 3, un historique rappelle le contexte et les motifs du choix de cet équipement. Il donne les principales étapes, les objectifs de l'opération et les points sensibles (chapitre 2). La description du projet fournit ses principales caractéristiques au sol et à bord, ainsi que les conditions de sa mise en oeuvre sur 15 ans avec les délais et les évolutions après la décision de le lancer (chapitre 3).

La seconde partie constituée des chapitres 4 à 7 fait le constat des écarts avec les prévisions en ce qui concerne les coûts et le financement (chapitre 4), l'amélioration de la sécurité (chapitre 5) et le bilan économique pour la collectivité (chapitre 6). Elle se termine par des remarques méthodologiques (chapitre 7).

Un dossier technique séparé a été établi avec les documents détaillés, notamment les notes de méthodologie ou de calcul.

2- Historique du projet

2.1 Rappel des principales étapes

Au cours des années 1980, la stabilité du nombre de franchissements de signaux d'arrêt fermés, l'augmentation du trafic attendue et la conviction des experts qu'il serait impossible d'améliorer la sécurité uniquement par des moyens de formation ont conduit la SNCF à envisager l'installation d'un système de contrôle de vitesse.

Le constat avait été fait qu'environ 20% des accidents graves étaient consécutifs à un franchissement de signal d'arrêt, ce qui n'était pas négligeable.

La SNCF a fait le choix d'assister le personnel au moyen de dispositifs réduisant les conséquences des défaillances humaines, celles-ci ne pouvant être totalement évitées, plutôt que d'automatiser.

La décision de la SNCF d'installer le contrôle de vitesse : un dispositif rapidement opérationnel et adaptable progressivement sur l'ensemble du réseau.

En 1985, deux accidents¹⁰ contraignent la SNCF à expérimenter un système de contrôle de vitesse déjà existant, afin de déboucher rapidement vers une généralisation à l'ensemble du réseau. La gravité des accidents enregistrés conduisait en effet à rechercher des solutions de mise en œuvre les plus rapides possibles, donc des dispositifs opérationnels et adaptables sur l'ensemble des lignes et non pas seulement sur quelques lignes nouvelles.

D'autres types de contrôles de vitesse existaient déjà (transmission voie machine continue au moyen de circuits de voie ou TVM développée à l'occasion de la mise en service du TGV Sud-Est en 1981 et limitée aux lignes nouvelles à grande vitesse ; SACEM en cours de développement depuis 1977 et mis en service en 1989 sur la ligne A du RER à fort débit), mais leur application à l'ensemble des lignes (ou les plus importantes) se révélait très onéreuse et d'un délai important. Le développement de l'électronique embarquée permettait d'envisager des dispositifs mieux adaptés.

En janvier 1986, la SNCF décide donc de tester le contrôle de vitesse développé par la société suédoise Ericsson¹¹ et qui équipait la quasi-totalité des chemins de fer suédois depuis 1981 ainsi qu'une partie des réseaux finlandais et norvégiens. Il s'agit d'un système de contrôle de la vitesse du train avec transmission par balises et visualisation en cabine d'informations d'aide à la conduite.

L'expérimentation s'est déroulée de 1987 à 1989 sur la ligne Paris-Le Havre (sections Poissy – Vernon et Vernon -Rouen), afin d'interroger les conducteurs sur le nouveau système et de proposer les adaptations nécessaires au réseau ferroviaire français.

A la suite de cette expérimentation, plusieurs modifications furent apportées au système suédois, afin de le rendre généralisable à l'ensemble du réseau et aux différents engins

¹⁰ Accident d'Argenton sur Creuse le 31 août 1985 (43 morts) dû au déraillement du train Paris – Port Bou à 95 km/h sur un appareil de voie sur lequel la vitesse prescrite par la signalisation était de 30 km/h. Accident de Novéant le 06 septembre 1985 avec déraillement du train Métrolor Nancy – Metz dans des circonstances proches.

¹¹ dont les licences avaient été rachetées par Alstom (à l'époque Alsthom)

moteurs. L'adaptation essentielle consiste en la possibilité d'équiper ponctuellement un signal alors que le dispositif d'origine est un équipement continu avec chaînage entre les signaux successifs. Ceci permettait à la SNCF d'installer le contrôle de vitesse progressivement durant plusieurs années sur l'ensemble du territoire en accordant une priorité aux signaux les plus sensibles.

Après l'accident de la gare de Lyon à Paris en 1988¹², la SNCF élabore en 1989 un programme d'amélioration de la sécurité. Ce programme, approuvé par son conseil d'administration au début de 1990, est le fruit des réflexions menées au sein de l'entreprise et enrichi par les observations et suggestions d'une commission d'experts faisant largement appel à des compétences extérieures.¹³ Il retient sur plusieurs années des réalisations selon les grands thèmes de la prévention des défaillances du système homme machine, de la réduction de leurs conséquences et du progrès des automatismes, au premier rang duquel figure la mise en œuvre du contrôle de vitesse par balises.

Le déploiement du KVB sur le réseau ferroviaire s'est effectué essentiellement durant les années 1990.

Les essais de mise au point du câblage et des logiciels du KVB ont été exécutés sur les bases de Vernon - Gaillon et Montereau - Sens pendant les trois premiers trimestres de 1990.

Une étude d'efficacité du système a été menée par la SNCF en 1990 pour optimiser les investissements au sol et à bord des engins moteurs¹⁴. Elle a permis de déterminer les signaux et les engins à équiper en première étape : carrés rouges¹⁵ de protection jugés les plus sensibles sur les lignes classiques électrifiées, ainsi que leurs annonces ; voies en impasse sur ces lignes les plus fréquentées ; engins moteurs électriques.

Un tel investissement de sécurité demande des délais de mise en œuvre importants et des dépenses lourdes programmées sur plusieurs années. Après la phase d'expérimentation, l'équipement en série des engins comme des installations au sol commence en 1990. A ce moment, le KVB est mis en service progressivement sur la ligne Paris-Le Havre. L'équipement au sol des lignes Paris - Marseille, Conneré - Nantes et Paris - Poissy débute également.

En outre, la mise en œuvre du système SACEM ne pouvant être réalisée dès 1990 en Ile de France sur la ligne C du RER à fort débit, il a été décidé de doter les signaux les plus importants d'un dispositif simplifié qui provoque l'arrêt automatique de tous les trains franchissant un signal fermé¹⁶. De plus, des dispositifs simplifiés de contrôle de vitesse ont été installés au 1989 sur les signaux d'accès aux gares souterraines de Paris Nord, Paris Austerlitz et Roissy. Un système permettant de diriger les trains en vitesse excessive vers une voie libre à quai en gare souterraine de Paris Lyon a été mis en service au cours du premier semestre 1990.

¹² Accident de la gare souterraine de Paris-Lyon le 27 juin 1988 (59 morts) dû à la collision d'un train de banlieue dont les freins avaient été intempestivement isolés avec une rame en attente de départ.

¹³ SNCF. Rapport de la commission d'experts chargée d'un audit sur les systèmes de sécurité de la SNCF. Avril 1991.

¹⁴ Sécurité du contrôle de vitesse par balises. Rapport de la Délégation générale à la sécurité de la SNCF. Janvier 1991.

¹⁵ Le carré rouge est un signal d'arrêt absolu qui protège généralement un ou plusieurs aiguillages sur voie principale.

¹⁶ Le DAAT (dispositif d'arrêt automatique des trains) est un système plus sommaire qui surveille la vitesse en un point déterminé seulement et ne permet pas une modulation de l'action en fonction du train. Sa simplicité de mise en œuvre l'a fait conserver dans des cas favorables de matériel roulant homogène ou de signalisation simple.

A la suite de l'accident de Melun¹⁷ en 1991, la commission d'enquête ministérielle a confirmé les orientations du programme de sécurité de l'entreprise, en particulier le développement des automatismes et du KVB. Des dispositions ont été prises pour accélérer au maximum la mise en œuvre du programme approuvé de la 1^{ère} étape en cours de réalisation. 3 700 locomotives et 5 000 signaux devaient être équipés en 1995, pour 2 milliards de francs environ.

La SNCF a également proposé aux pouvoirs publics une seconde étape prolongeant la première: extension à tous les carrés de protection des appareils de voies et à leurs annonces sur les lignes classiques électrifiées et à toutes les voies en impasse sur ces lignes ; extension aux engins moteurs thermiques fréquentant régulièrement les lignes classiques électrifiées. Cette deuxième étape a été approuvée par le conseil d'administration de l'entreprise le 22 avril 1992 et par le ministre des transports le 23 juillet 1992. Il consacre deux autres milliards de francs à l'équipement de 12 000 signaux supplémentaires, de 700 engins diesel et 200 automotrices de banlieue.

Le KVB a connu en 1991 son premier exercice de réalisation à grande échelle.

L'extension s'est poursuivie en 1992 avec notamment la généralisation de l'équipement des signaux de limitation temporaire de vitesse (LTV) sur l'ensemble du réseau électrifié en commençant par les signaux mobiles de chantier sur plusieurs artères importantes et la mise en œuvre des équipements prévus pour la première étape. La commission ministérielle d'enquête établie à la suite de l'accident de Saint Germain au Mont d'Or¹⁸ en 1992 a encore confirmé la nécessité de considérer cet équipement comme prioritaire.

Dès 1993, le retour d'expérience commençait à être disponible et a permis de concevoir des perfectionnements du système. Ils seront réalisés à partir de la mi-1994, afin d'améliorer l'ergonomie de conduite à l'approche des signaux fermés.

En 1994, la couverture du territoire par le KVB s'est poursuivie à un rythme soutenu. Les études d'amélioration du système ont porté sur la recherche d'un dispositif de traitement de proximité des signaux afin d'améliorer l'ergonomie de conduite à l'approche des signaux annoncés fermés, sur le développement d'une balise numérique qui autorise une réduction du nombre de balises à installer et sur la mise au point d'une nouvelle version du logiciel de bord destiné à rendre le système plus disponible et à progresser dans la transparence pour les conducteurs.

Sur les bases du retour d'expérience et de l'utilisation du KVB, une évolution importante des règles de comportement de conduite lors du franchissement du signal d'avertissement rencontré fermé a été étudiée et testée. Dénommée VISA (vitesse sécuritaire d'approche), cette règle sera généralisée en 1995.

La mise en place du DAAT (dispositif d'arrêt automatique des trains) a été réalisée dans les gares de voie unique pour lesquelles il n'était pas prévu d'installer le KVB. Ce système est destiné à arrêter un train qui partirait intempestivement d'une gare. L'équipement des gares sera achevé en 1995 et celui des locomotives et autorails sera étalé jusqu'en 1997.

A partir de 1995, les investissements en KVB ont décliné régulièrement au fur et à mesure de l'équipement du réseau et des engins. La fin des années 1990 coïncide avec l'achèvement

¹⁷ Accident de la gare de Melun le 17 octobre 1991 (16 morts) dû à la collision d'un train de marchandises qui avait franchi un carré rouge avec un train de voyageurs.

¹⁸ Accident de Saint Germain au Mont d'Or le 16 septembre 1992 (décès de l'agent de conduite, 20 blessés) dû à une collision par rattrapage suite au non respect du signal sémaphore fermé

progressif d'une étape significative en terme de sécurité ferroviaire qui, avec le contrôle de vitesse, l'asservissement « traction freinage »¹⁹, le DAAT, etc. , aura vu se mettre en place un dispositif d'un niveau jamais atteint de prise en compte de la défaillance humaine dans le domaine de la conduite.

Jusqu'à la création de RFF en 1997, la SNCF a assuré la maîtrise d'ouvrage et le financement sur ses fonds propres à la fois de l'équipement de l'infrastructure et des engins moteurs, en veillant à la cohérence des équipements sol et bord. En 1997, RFF est devenu propriétaire du réseau ferré national et maître d'ouvrage de toute opération d'investissement sur cette infrastructure. Au 1^{er} janvier 1998, RFF a donc repris la maîtrise d'ouvrage de l'équipement de l'infrastructure en KVB et assure son financement totalement sur ses fonds propres. Il délègue à la SNCF la maîtrise d'ouvrage et la mandate pour terminer l'équipement de l'infrastructure conformément au programme KVB.

Comme la transmission ponctuelle par balises empêche de reprendre la marche normale en cas de réouverture du signal, la densité des circulations sur le réseau d'Ile-de-France a nécessité de mettre en œuvre des systèmes de contrôle de vitesse aptes à se libérer de cette contrainte. Cette évolution du KVB est basée sur la transmission continue utilisant les files de rails mise au point lors du projet SACEM et n'est développée que sur deux courtes sections de lignes très chargées dans Paris, compte tenu de son surcoût : KVBP (P pour prolongements) sur la partie centrale de la ligne C du RER et KCVP compatible avec les matériels de la RATP dans le tunnel entre Châtelet et Gare du Nord (lignes B et D du RER). Ces investissements en région parisienne et les derniers équipements de la seconde étape sont réalisés jusqu'en 2006.

Compte tenu de l'ampleur de la tâche, l'équipement du réseau ferroviaire français et des engins a donc demandé 15 ans, la première étape s'étant achevée en 1995 et la seconde en 2006.

Le KVB est déployé sur les lignes électrifiées, soient environ 15 000 km. Les efforts d'industrialisation réalisés et son principe de transmission ponctuelle rendent sa mise en œuvre aisée pour couvrir un signal ou une limitation de vitesse. Le cycle de vie du KVB ne devrait économiquement justifier son remplacement qu'au delà de 2025.

Dans le même temps et pour les mêmes raisons, les autres chemins de fer européens se sont équipés, mais chacun avec leurs spécifications nationales pour des raisons historiques. Certains sont associés aux dispositifs de signalisation en cabine (LZB en Allemagne), d'autres de la même famille que le KVB viennent en redondance ou en complément de la signalisation extérieure (appelés généralement ATC, ATP ou ATS). On compte actuellement une vingtaine de systèmes différents²⁰, qui n'assurent pas l'interopérabilité.

Le KVB n'est pas interopérable. Le système ERTMS²¹ est le standard européen de contrôle de vitesse et arrive maintenant en phase opérationnelle. Son déploiement sur le réseau RFF sera

¹⁹ Le dispositif détecte à bord de l'engin moteur tout freinage significatif (pression inférieure à 4,5 bars) et provoque d'office la coupure de l'effort moteur si le conducteur a omis de le faire. La traction ne peut alors être remise qu'après avoir ramené le manipulateur de traction à zéro.

²⁰ ASFA, ATB, ATB NG, ATP/TPWS, BACC, Crocodile, Ebicab, EVM, KVB, LS, LZB, SCMT, SHP, Signum, TBL1, TBL2, TVM, ZUB (Source UIC)

²¹ ERTMS : European Rail Traffic Management System, ou système de gestion du trafic ferroviaire européen. Il s'agit d'un système de contrôle commande des trains, harmonisé au niveau européen, destiné à se substituer progressivement aux systèmes de signalisation existants dans les différents pays. Les fonctions d'ERTMS sont implantés pour partie au sol, pour partie à bord des trains et les moyens de communication entre bord et sol sont normalisés : communications ponctuelles pas balises ou communications continues par radio GSM.

progressif et impliquera une cohabitation avec la TVM pour les lignes à grande vitesse et avec le KVB pour les lignes conventionnelles²². ERTMS²³ va être mis en place d'abord à l'horizon 2015 en superposition avec le KVB sur les corridors européens de fret ferroviaire Anvers-Bâle, Rotterdam- Lyon et Barcelone – Lyon – Milan. Ceci évite la superposition des différents systèmes de contrôle de vitesse dans les locomotives des différents réseaux.

Calendrier de la mise en œuvre du KVB

Date	Faits saillants
1983	Essais par la SNCF et Alstom d'un système de contrôle de vitesse "crocodile-brosse", non retenu.
Janvier 1986	Après les accidents en 1985 d'Argenton sur Creuse et de Novéant causés par un dépassement de la vitesse prescrite, la SNCF décide de tester le contrôle de vitesse des chemins de fer suédois.
1987 à 1989	Expérimentation du KVB sur la ligne Paris Le Havre.
1989	Après l'accident de la gare souterraine de Paris Lyon, élaboration d'un programme d'amélioration de la sécurité par la SNCF, incluant le contrôle de vitesse, avec l'aide d'une commission d'experts extérieurs.
1990	Approbation du programme d'amélioration de la sécurité par le conseil d'administration de la SNCF.
1990	Essais de mise au point du câblage et des logiciels du KVB.
1990	Etude d'efficacité du KVB menée par la SNCF pour optimiser et programmer les investissements du KVB au sol et embarqués.
1990	Début de l'équipement en série en KVB des engins moteurs et des lignes Paris Le Havre, Paris Marseille et Connéré Nantes.
1991 1995	Réalisation de la première étape d'équipement en KVB (.5000 signaux et 3700 engins sur lignes électrifiées)
17 octobre 1991	Après l'accident de Melun dû à un franchissement de carré, l'accélération du programme approuvé esr décidé et une deuxième étape d'équipement est lancée.
1992	Approbation de la deuxième étape d'équipement en KVB par le conseil d'administration de la SNCF (22 avril 1992) et le ministre des Transports (23 juillet 1992).
1995	Evolution des règles de conduite tenant compte du KVB (règle VISA).
1992 2006	Réalisation de la seconde étape, sauf compléments au cas par cas

²² Le STM-KVB ou STM-TVM (specific transmission module) joue à bord le rôle d'interface entre un équipement sol KVB ou TVM et un équipement bord ERTMS. Il permet une transition progressive entre les lignes interopérables au plan européen, équipées seulement d'ERTMS, et d'autres lignes, équipées en KVB ou TVM.

²³ Niveau 1, avec les mêmes fonctionnalités que le KVB

2.2 Les objectifs du projet

Trois objectifs ont guidé le projet.

L'objectif principal est d'abord d'améliorer la sécurité des circulations en évitant grâce à des dispositifs automatiques les situations les plus dangereuses. Les accidents ferroviaires ont montré que les franchissements de signaux d'arrêt fermés et les non-respects de limitation de vitesse font partie des défaillances les plus risquées. Le contrôle de vitesse doit permettre de s'en prémunir.

Ensuite, le système de contrôle de vitesse n'est pas « de sécurité »²⁴. Les considérations de délai de développement, les contraintes économiques et techniques ont fait que le KVB n'a pas été conçu avec les caractéristiques d'un système de sécurité. Il ne doit pas se trouver en série dans la chaîne signal conducteur frein et rester transparent pour les conducteurs tant qu'ils respectent les règles de conduite. Il déclenche automatiquement un freinage d'urgence dans le cas contraire.

Enfin, il faut pouvoir équiper progressivement l'ensemble du réseau ferroviaire pour obtenir un maximum d'efficacité avec un minimum de signaux équipés. Le KVB devait entraîner une réduction du risque de franchissement de signaux d'arrêt fermés (carrés) de 38% en 1^{ère} étape, puis de 78% avec les deux étapes. Ceci renforce la nécessité de transparence du système afin de maintenir la bonne fiabilité antérieure des conducteurs et éviter de perdre dans les zones sans KVB ce qu'on gagne dans les zones équipées.

2.3 Les points sensibles du projet

La vigilance des conducteurs ne doit pas être affectée par le KVB. Les concepteurs du KVB ont dû faire en sorte que ceux-ci ne soient pas incités à se reposer sur le système qui ne constitue qu'une boucle de rattrapage.

La philosophie du KVB repose donc sur deux principes :

- la fiabilité globale du couple homme - machine doit résulter de la fiabilité la plus indépendante possible du conducteur et du KVB,
- en cas d'absence ou de neutralisation du KVB, le conducteur doit conserver ses acquis dans la gestuelle de conduite.

Dans ces conditions, le franchissement d'un signal d'arrêt fermé²⁵ ne survient que si le conducteur et le KVB sont simultanément défaillants.

La probabilité de franchissement sans contrôle de vitesse mais avec la répétition des signaux en cabine peut être estimée à $1,1 \cdot 10^{-5}$ par heure à partir des nombres annuels de signaux fermés franchis et des heures de conduite. Les experts évaluent le taux de défaillance d'un conducteur par signal rencontré fermé à $1,6 \cdot 10^{-5}$.

²⁴ A la différence de la TVM sur les lignes à grande vitesse ou de SACEM sur le RER A en Ile de France

²⁵ Plus précisément, il s'agit du franchissement du signal d'arrêt fermé avec engagement du point dangereux à protéger (un aiguillage par exemple), car les courbes de contrôle de vitesse sont calculées pour que le train n'engage pas ce point protégé.

Un sondage réalisé par la SNCF en 1990 a confirmé l'ordre de grandeur du taux de défaillance d'un conducteur par signal rencontré fermé : $2,4 \cdot 10^{-5}$ pour l'ensemble des signaux d'arrêt et $1,9 \cdot 10^{-5}$ pour les seuls carrés rouges.

Ces probabilités de défaillance correspondent à des taux d'erreur humaine relatifs à une personne bien formée et motivée, agissant pratiquement par réflexe (en moyenne, un franchissement de carré rouge par un conducteur tous les 25 ans). Elles présentent les limites de ce qu'on peut espérer pour une population d'environ 20 000 conducteurs. Il fallait donc avoir recours aux automatismes, car on ne pouvait guère espérer diminuer autrement le nombre de franchissements. Une aide technique s'avérait nécessaire pour obtenir un saut significatif d'amélioration de la sécurité.

Les études de disponibilité du KVB ont montré que celles-ci étaient essentiellement conditionnées par le système embarqué. Le KVB divise la probabilité de franchissement dans un rapport compris entre 250 et 800 si le frein est parfait et dans un rapport de 34 à 147 si le frein a une indisponibilité de $5 \cdot 10^{-7}$.

Ainsi, la probabilité de franchissement d'un carré rouge fermé équipé de KVB par un engin lui-même équipé est réduite de $1,9 \cdot 10^{-5}$ à $5,4 \cdot 10^{-7}$.

Mais si le KVB venait à modifier le comportement du conducteur en multipliant par un facteur k son taux de défaillance, l'effet positif sur la sécurité pourrait même être annulé.

Le KVB diminue le débit des lignes

Le KVB est à transmission ponctuelle et impose au conducteur franchissant un signal d'avertissement fermé de régler sa vitesse pour s'arrêter avant le signal d'arrêt suivant, même si ce dernier s'est ouvert entre temps.

Pour éviter l'arrêt au signal ouvert, les courbes théoriques s'interrompent à 30 km/h au franchissement (ou à 10 km/h si la « distance de glissement » séparant du point protégé est inférieure à 100 m^{26}).

Ces contraintes ont été assez mal vécues au départ par les conducteurs, car elle les obligeait à maintenir leur vitesse sous les courbes de contrôle du KVB parfois restrictives par rapport aux possibilités réelles de freinage des trains.

Compte tenu du retour d'expérience, une évolution importante des règles de comportement de conduite est intervenue dès 1995 : la vitesse sécuritaire d'approche ou « VISA ». Pour ne pas être pris en charge par le KVB, le conducteur doit effectuer une décélération au plus tard au franchissement du signal d'approche fermé et, de plus, ne pas dépasser la vitesse de 30 km/h au début de la zone d'approche du signal fermé (200 m en amont) et tant qu'il ne l'aura pas franchi, même s'il s'ouvre.

Lorsque l'approche à 10 km/h au lieu de 30 km/h est imposée pour des raisons d'implantation du signal (mauvais glissement), des "balises X" de proximité du signal placées normalement à 150 m en amont permettent de repousser cette contrainte au moment où le train franchit cette balise X si le carré est fermé. La mise en œuvre de cette modification du système à partir de la mi 1994 a été bien accueillie par les conducteurs, car elle améliorerait l'ergonomie de conduite. Ceci

²⁶ ou à V mètres si la vitesse est supérieure à 100 km/h.

a permis de porter par sécurité la distance de glissement imposant la contrainte des 10 km/h de moins de 100 mètres à moins de 200 mètres. Il faut noter que des balises de réouverture pour rafraîchir l'information avant le signal ne convenaient pas car elles étaient très chères et donnaient une indication libératoire sur le visualisateur en cabine de conduite contraire au principe de transparence du KVB.

Cette réduction de capacité des lignes équipées de KVB présente des inconvénients en zone dense. Des contrôles de vitesse spécifiques à l'Ile-de-France et aptes à gérer la réouverture des signaux ont ainsi dû être installés pour ces raisons de débit et de compatibilité avec les matériels de la RATP. Le KVBP (P pour prolongement) à transmission continue plus chère a été installé sur la partie intra-muros de la ligne C du RER à densité de circulations très forte. De même, le KCVP (compatible avec les rames RATP) équipe le tunnel très chargé entre Gare du Nord et Châtelet (lignes B et D du RER).

3- Description de l'opération

L'installation du KVB sur l'ensemble du réseau ferroviaire français a constitué un investissement très important estimé dès le départ à plus de 4 milliards de francs et a nécessité une planification rigoureuse. Ce chapitre décrit d'abord le système KVB, puis les conditions de sa mise en œuvre et enfin les évolutions du projet après la décision de faire.

3.1 Les principales caractéristiques du KVB

Le KVB réalise un contrôle automatique de la vitesse et du franchissement de certains signaux fermés à l'aide d'un calculateur embarqué sur les engins moteurs qui prend en compte les informations sur le mobile et sur la voie et les signaux.

Lorsque la vitesse dépasse les limites prescrites, le KVB émet un signal sonore pour avertir le mécanicien et déclenche les opérations d'arrêt automatique en l'absence de correction. Le KVB est également utilisé pour la transmission d'informations en vue d'assurer le fonctionnement d'automatismes embarqués sur les mobiles (contrôle d'armement de la TVM, commutation canal radio sol - train, etc.).

La transmission du sol vers le bord est réalisée à l'aide de balises installées sur les zones équipées. La transmission est ponctuelle²⁷. Ceci présente un inconvénient pour le débit des lignes. Le conducteur doit continuer à respecter les procédures réglementaires correspondant à un signal d'annonce rencontré fermé jusqu'au franchissement du signal d'arrêt annoncé, même si celui-ci s'est ouvert.

Le système KVB est composé de deux sous-systèmes : le « sol » et le « bord » qui communiquent entre eux par une transmission électromagnétique.

- Le sous-système « sol » transmet depuis le sol vers le train des informations sur la signalisation à respecter par la circulation et sur son état. Cette transmission ponctuelle s'effectue en des points particuliers répartis le long de la voie contrairement aux systèmes continus de transmission qui utilisent généralement le rail ou la radio comme support. Pour cela, le système utilise des installations fixes appelées balises, implantées dans l'axe de la voie, certaines d'entre elles étant autonomes, d'autres émettant des informations élaborées par un appareil appelé codeur. Les données transmises sont la vitesse d'annonce à respecter (vitesse but), et la vitesse d'exécution. Le contrôle de franchissement du signal d'arrêt fermé est traduit par une vitesse d'exécution nulle.

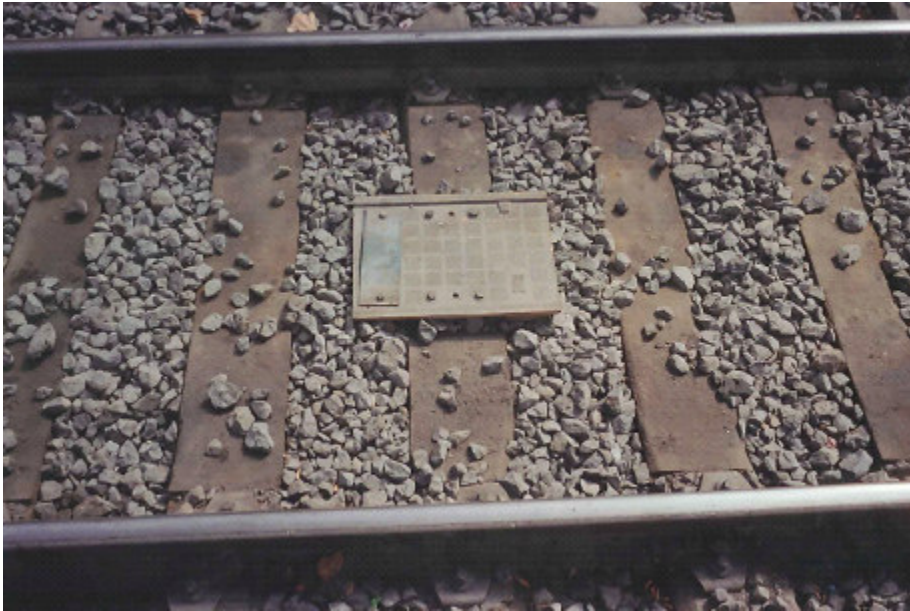
Ce sous-système « sol » est composé :

- d'un boîtier, appelé codeur, dans lequel sont enfichées les différentes cartes mises en place en fonction de la configuration du terrain. Il prend les informations d'état de la signalisation adressées aux conducteurs aux bornes des lampes des signaux situés le long de la voie. Le codeur va aussi chercher dans les postes ou les centres de signalisation les informations complémentaires (itinéraires, etc.) qui lui sont nécessaires pour sélectionner les données qu'il devra envoyer à l'équipement embarqué. Ensuite, le codeur confectionne les messages

²⁷ C'est-à-dire qu'elle n'est réalisée qu'en des points déterminés contrairement à la TVM (lignes à grande vitesse) ou au SACEM (ligne A du RER en Ile de France).

et les envoie vers une ou plusieurs balises. Les liaisons entre le codeur et tous les autres constituant sont réalisées par câbles ;

- de balises par groupe de 2 à 5 (le minimum de 2 est nécessaire pour connaître le sens du mouvement du mobile) constituées d'un corps rectangulaire en polyester renforcé de fibres de verre. Elles sont implantées au pied de chaque signal ainsi qu'en tout point où le respect d'un taux de vitesse est applicable (pointe d'un aiguillage, etc.). Les balises n'ont pas besoin de source d'énergie. elles sont activées par l'équipement bord (balises passives)²⁸. Certaines balises émettent des messages d'informations élaborées par le codeur, elles sont dites commutables. D'autres émettent un message invariable dans le temps, elles sont dites fixes. Le message est alors programmé dans un bouchon de codage fixé sur la balise. D'autres enfin ne servent qu'à compléter un groupe de balises : elles sont appelées marqueur. Chaque groupe de balises constitue un point d'information ;



Balise KVB

- d'un outil de test analogique, appareil autonome servant à la mise en œuvre sur le site et à la maintenance du système.

Il existe des points d'information « signal » et des points d'information « vitesse ». Les points d'information « signal » sont, en général, reliés entre eux. Cette liaison est appelée chaînage. Elle est réalisée par la transmission au mobile, à chaque signal et pour chacune des informations qu'il peut présenter, de la distance à laquelle il va rencontrer le signal suivant.

Afin de permettre au mobile de calculer la courbe de contrôle de la vitesse du train, il lui est aussi transmis pour chacune de ces informations la vitesse d'exécution à respecter au signal franchi et les mêmes types de données sont transmis pour les limitations de vitesse annoncées (limitation permanentes ou temporaires).

²⁸ Les balises utilisent l'énergie transmise par l'antenne du mobile sous forme de rayonnement électromagnétique de fréquence proche de 27 MHz.

- Le sous-système « bord » est constitué sur les engins moteurs :
 - d'une antenne d'émission réception placée sous l'engin moteur qui active les balises en émettant constamment une fréquence et recueille les informations des balises ;
 - d'un calculateur de traitement (avec tiroirs électroniques et cartes) qui reçoit les données de l'antenne et celles entrées via les panneaux de données, calcule les courbes de contrôle de la vitesse du train et informe le conducteur sur l'état de fonctionnement du système (contrôles en cours, détection de comportement inadapté du mécanicien en fonctionnement dégradé). Il agit sur les organes de freinage en cas de dépassement de la vitesse limite ;
 - d'un panneau de données qui transmet au calculateur les caractéristiques du mobile. C'est le conducteur qui renseigne le système sur les capacités du train, en entrant les données au départ : catégorie du train (voyageurs, marchandises, messagerie, automoteur), coefficient de décélération pour les courbes de freinage et vitesse maximale du convoi. Sur les trains automoteurs à caractéristiques relativement constantes, un dispositif évite de saisir à chaque mission les mêmes paramètres ;
 - d'un panneau de visualisation destiné à informer le conducteur du mode de fonctionnement du KVB. La visualisation en cabine est réduite afin de ne pas influencer le conducteur. Elle le renseigne lorsque le contrôle de vitesse est actif, au franchissement d'un signal d'annonce d'arrêt fermé et si le contrôle est actif pour rouler à plus de 160 km/h et en cas de contrôle de préannonce ou de contrôle à 160 km/h pour les seuls trains roulant à plus de 160 km/h²⁹ ;
 - des liaisons avec le train (tachymètre, alimentation, détermination de la cabine en service dans le cas d'engins bi cabine, commande de freinage d'urgence, etc.).
- Pour la transmission sol - bord : le mobile émet par son antenne une fréquence électromagnétique. La balise utilise la puissance de l'émission pour retourner vers le mobile une fréquence (télé alimentation par induction magnétique et informations émises par la balise lorsqu'elle est télé alimentée). Une suite de bits, qui constituent des télégrammes, est alors retenue par le mobile. La structure du message et la signification de la valeur de ces octets dépendent de la génération et de la technologie du sous-système sol, c'est à dire du codeur et des balises.

Le KVB est interfacé avec les enregistreurs des événements de conduite (à bande graphique papier ou à cassette numérique) :

- franchissement d'un signal d'arrêt fermé
- déclenchement du freinage d'urgence
- signaux de préannonce ($V > 160$ km/h)
- validation des paramètres du KVB pour les trains à composition variable

Il existe un commutateur d'isolement du KVB qui permet en cas de panne du système de terminer la mission du train suivant des procédures réglementaires et de regagner le centre de maintenance.

²⁹ La circulation à une vitesse supérieure à 160 km/h sur une ligne à signalisation au sol n'est autorisée que si l'engin moteur est équipé d'un contrôle de vitesse.

Le calculateur assure le contrôle des décélérations, des vitesses d'exécution et du franchissement des signaux d'arrêt non permissifs.

A l'approche des signaux d'arrêt, le contrôle des vitesses d'exécution est plus restrictif lorsque la distance entre le signal et le point protégé est plus courte. Deux taux de vitesse d'exécution ont été retenus : 30 km/h lorsque cette distance est supérieure à 200 m et 10 km/h dans l'autre cas. Le mécanicien est informé de cette particularité au signal d'annonce. Dans ce dernier cas, l'impact sur les circulations est donc important, d'autant que ces implantations se trouvent dans les zones à forte circulation avec des plans de voies complexes. L'approche d'un signal annoncé fermé doit avoir lieu à 10 km/h, même s'il s'ouvre entre temps. Une balise X ou « prox » peut-être installée à 150 m du signal d'arrêt pour limiter cet inconvénient au parcours entre celle-ci et le signal d'arrêt.

Le conducteur est averti s'il dépasse de 5 km/h la vitesse d'exécution contrôlée (courbe d'alerte) et lorsque le calculateur a déclenché les opérations d'arrêt si la vitesse n'a pas chuté de manière suffisante.

Les aspects sécuritaires

Au sol, le principe de base de composition des codeurs est la sécurité intrinsèque, c'est-à-dire que la défaillance d'un composant ne peut conduire à un comportement du système contraire aux contraintes de sécurité. Pour des raisons de sécurité, chaque point d'information est constitué d'au moins deux balises, afin de détecter une balise en panne ou manquante. De plus, ceci permet de définir le sens de circulation des trains.

Dans le calculateur de bord, deux logiciels travaillent en alternance avec des données inverses et des méthodes particulières sont utilisées pour le développement (méthode « B »).

3.2 Les délais de mise en œuvre du KVB

La gravité des accidents avait conduit la SNCF dès 1985 à installer le contrôle de vitesse sur le réseau et les engins moteurs le plus vite possible. Le choix du dispositif existant sur les chemins de fer suédois permettait une mise en œuvre plus rapide et progressive moyennant quelques adaptations.

Le programme d'équipement, qui s'appuyait sur une étude d'efficacité du système menée par la SNCF en 1990 pour optimiser les investissements au sol et à bord des engins moteurs, distinguait deux étapes en fonction des risques :

- 1^{ère} étape sol : carrés de protections des appareils de voie jugés les plus sensibles, sur voies principales des lignes classiques électrifiées, ainsi que leurs annonces³⁰ ; voies en impasse sur ces lignes les plus fréquentées ;
- 1^{ère} étape bord : engins moteurs électriques ;
- 2^{ème} étape sol : extension de la 1^{ère} étape à tous les carrés de protection des appareils de voies et à leurs annonces sur les lignes classiques électrifiées et à toutes les voies en impasse sur ces lignes ;

³⁰ L'équipement en KVB d'un carré nécessite l'équipement de 1,54 panneau en moyenne, compte tenu des annonces à distance.

- 2^{ème} étape bord : extension aux engins moteurs thermiques fréquentant régulièrement les lignes classiques électrifiées.

C'est l'accident de Melun en 1991 qui a conduit les pouvoirs publics à accélérer la première étape alors en cours, qui devait être achevée en 1993 pour les signaux et en 1995 pour les engins, et à lancer une deuxième étape à partir de juin 1992. L'ensemble du réseau électrifié et des engins de ligne devait être équipé en 1998.

Programme prévu d'équipement en KVB

	Première étape (1991 1995)	Deuxième étape (1992 1998)	Programme total
Engins moteurs	3700	2300	6000
Signaux fixes	5000	11000	16000
<i>dont carrés rouges</i>	<i>3500</i>	<i>7500</i>	<i>11000</i>
Signaux de chantier	750	600	1350

Source: SNCF

La fabrication du matériel de série de KVB analogique pour le sol a commencé dès 1989 à partir des développements effectués par l'entreprise Jeumont Schneider, puis Alstom, et dirigés pour la partie sol au sein de la SNCF par la direction de l'équipement puis par la direction de l'ingénierie.

Il n'y avait pas de chef de projet KVB, mais une coordination de niveau important au niveau de la Direction générale de la SNCF (Directeur adjoint du Transport).

La même année, les études d'exécution du premier tronçon de ligne Poissy - Mantes choisi pour être équipé d'un système de contrôle de vitesse des trains ont été réalisées. Ce tronçon représentait la zone la plus dense du tronçon expérimental Poissy - Vernon. Les études et travaux menés par la direction régionale SNCF de Paris Saint Lazare avec l'appui de la direction de l'ingénierie ont permis la mise en service de ce premier tronçon au sol dans le courant de l'année 1990.

A bord, le programme complet a porté sur l'équipement de plus de 5 000 locomotives, automoteurs, TGV, automotrices appartenant à plus de 30 séries d'engins dont chacune d'elles a donné lieu à des études spécifiques parfois fort complexes. Pour la mise en œuvre, il a été fait appel essentiellement à 14 établissements industriels de maintenance du matériel roulant.

La première étape a été bien réalisée de 1991 à 1995. La seconde étape s'est terminée en 2006 (avec un peu plus de 200 signaux restants à équiper en 2006 pour 180 M€). L'équipement des engins moteurs est fait depuis 2002. Les nouveaux engins sont équipés d'origine et tous ceux circulant sur le réseau ferré national plus d'une heure par jour sur ligne équipée doivent être munis du KVB (arrêté ministériel du 1^{er} juillet 2004).

L'allongement des délais de réalisation de la seconde étape (15 ans au lieu de 6 ans) s'explique par les délais de la programmation et des études très importantes. Les deux étapes ont été menées de front comme un seul programme. Il était préférable d'équiper des zones complètes ou d'attendre l'occasion d'autres travaux.

Les balises numériques succédant aux balises analogiques visaient notamment en modernisant le système à diminuer le coût (-20% pour un signal). Leur mise en place s'est faite sans fausse manœuvre dans le cadre des déploiements en cours. Les frais de remplacement de 2004 à

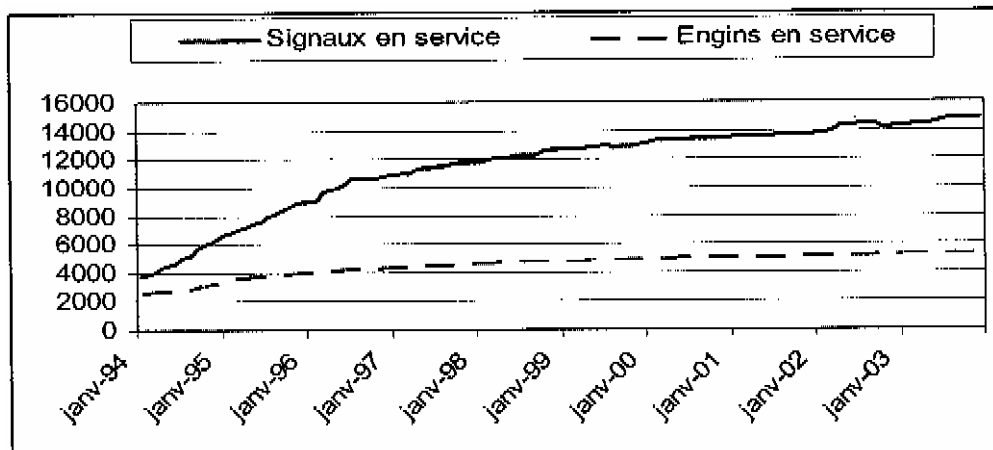
2007 des 14 000 balises numériques défectueuses (sur 120 000 balises environ au total) sont en grande partie pris en charge par Alstom. Cette défaillance technique a contribué à retarder la mise en œuvre de la deuxième étape, car les régions SNCF ont attendu la livraison des nouvelles balises fiables pour reprendre les travaux, la priorité des livraisons était accordée à la maintenance corrective.

L'ensemble du matériel affecté à l'Ile de France (Transilien) est équipé du KVB, avec l'adaptation à la transmission continue compte tenu des très forts débits. (KVB³¹ et KCVP³¹ sur les tronçons centraux des lignes C et D du RER).

Programme KVB réalisé

	Première étape (1991 1995)	Deuxième étape (1992 2006)	Programme total
Engins moteurs	3700	1888	5588
Signaux fixes	5000	11100	16100
Signaux de chantier	750	600	1350

Sources : SNCF RFF



Source : SNCF

Le programme d'équipement en KVB et les délais ont été respectés pour la première étape prioritaire (1991 1995). En revanche, la seconde étape (1992 2006) s'est étalée sur près de 15 ans au lieu de 6 ans.

³¹ Contrôle de vitesse RATP compatible avec le KVB

3.3 Les évolutions du projet après la décision de faire

L'évolution des équipements au sol

La technologie pour les installations sol a évolué vers un nouveau type de balise.

En 1985, pour hâter l'installation du contrôle de vitesse, la technologie développée par les chemins de fer suédois est retenue mais ses règles de mise en œuvre sur les installations françaises doivent être validées préalablement à son déploiement sur l'ensemble du territoire national. Pour cela, une expérimentation est décidée sur le tronçon Poissy - Vernon de la ligne Paris - Le Havre, soit environ 55 km. Des circuits codeurs et des balises, fabriqués directement par la société Ericsson, sont installés et raccordés aux installations de signalisation dès 1986.

Il a été décidé pour des raisons de délai de conserver le principe de la transmission électromagnétique sol/bord des messages et l'élaboration en technologie analogique de ces messages, mais de reprendre l'ergonomie du codeur et de l'outil de test.

Par ailleurs, un développement est entrepris pour adapter le KVB aux particularités techniques de la signalisation française et éviter les principales contraintes de mise en œuvre identifiées lors de cette expérimentation. Ainsi est né le KVB analogique au sol, appelé ainsi en référence à la technologie utilisée pour le codeur.

Dès le début des travaux menés par la SNCF pour définir le contrôle de vitesse de son réseau, Jeumont Schneider, devenu Alstom, a participé au contrôle de vitesse. Au début des années 1980, la SNCF avait déjà préparé la définition et la conception d'un système de contrôle de vitesse destiné à l'ensemble du réseau. Accompagnées d'Alstom (à l'époque Jeumont Schneider), les études se sont orientées vers l'utilisation du contact existant pour la répétition des signaux crocodile (dispositif de forme allongée placé entre les deux files de rails au droit du signal) - brosse (sous les engins moteurs) pour assurer la transmission ponctuelle. Les premiers prototypes ont été essayés à partir de 1983 (KV CRO), mais le système n'a pas été retenu. Lorsque le choix de la technologie du KVB a été fait, un accord de licence a été conclu avec Ericsson, industriel suédois ayant développé cette technologie. Des composants initiaux testés dans le cadre de l'expérimentation Poissy - Vernon, seuls les composants de transmission (balise au sol, antenne à bord) ont été conservés. Selon les termes de l'accord conclu, ces composants ont été pendant quelques années achetés en Suède avant d'être industrialisés en France par Alstom (jusqu'à 120 balises par jour) qui en a ainsi acquis la technologie. Cette connaissance de la technologie a été mise à profit sur les aspects transmission pour le développement du KVB sol numérique dont les balises numériques ont été entièrement conçues par Alstom de même que les codeurs.

La technologie du KVB analogique présente des inconvénients : les codeurs des signaux complexes ont un encombrement important ; les signaux complexes sont équipés de 4 ou 6 balises en moyenne, ce qui pose des problèmes d'implantation ; les balises sont soumises à des fortes contraintes et il est souhaitable d'en limiter le nombre (ce qui diminue la gêne pour la maintenance de la voie) ; cette technologie induit un grand nombre de types de matériels, ce qui nécessite des stocks.

Il est donc décidé, dès 1991, de lancer les études d'une nouvelle génération de matériel sol KVB qui utilisera les performances de la technologie numérique afin d'obtenir un codeur d'encombrement réduit utilisable pour tout type de panneau et une balise unique servant à toutes les applications. Ainsi est né le KVB numérique, appelé ainsi en référence à la technologie utilisée pour le codeur.

En 1993, à partir de l'expérience acquise, Alstom a proposé en collaboration avec la SNCF un équipement au sol plus performant en utilisant les techniques numériques au lieu des techniques analogiques. Depuis 1996, le programme d'installation du KVB bénéficie de ce nouveau KVB-SN (sol-numérique), permettant une baisse des coûts avec un niveau de sécurité au moins équivalent.

En technologie numérique, il n'y a donc qu'un seul type de codeur et un seul type de balise. Une balise pouvant transmettre dans un même message plusieurs points d'information analogiques, moins de balises sont donc nécessaires.

Tout ceci a pour avantage de :

- limiter les coûts de mise en œuvre
- faciliter l'implantation des différents éléments, notamment en voie
- limiter les contraintes entraînées vis à vis de la maintenance voie.

Ceci permet une diminution du coût moyen de l'équipement d'un signal de 20%.

Le système KVB embarqué sachant lire et interpréter à la fois les messages du KVB analogique et de KVB numérique, il est possible d'avoir dans une même zone des signaux équipés de l'une ou l'autre technologie.

L'évolution des équipements embarqués

Avec la première mise en service apparut très vite la nécessité de faire un certain nombre d'évolutions fonctionnelles au niveau du logiciel. Un comité de version fut créé pour gérer les demandes d'évolution.

La première évolution de l'unité centrale du KVB fut le passage à une structure avec deux logiciels travaillant en alternance. Cette version a été mise en service en 1992 avec la préannonce en Alsace pour le service TER 200.

La relative saturation des capacités du microprocesseur et l'apparition de nombreuses évolutions comme le passage à des balises numériques conduisent à développer la version suivante du logiciel avec un autre microprocesseur. Le développement de cette version a été réalisé à l'aide de la méthode « B » (technique mise en œuvre pour la conception de différents produits informatiques sensibles vis à vis de la sécurité et utilisée principalement dans le ferroviaire et l'aéronautique).

La "méthode B" utilisée pour le développement des logiciels de l'unité centrale du KVB (lors de l'introduction des balises numériques début 1996 par exemple) est employée pour le développement des logiciels de sécurité, principalement dans le ferroviaire et l'aviation. Elle permet d'avoir l'assurance de la conformité du logiciel à ses spécifications fonctionnelles. Le principe général consiste à traduire ces spécifications dans un langage de haut niveau qui est ensuite affiné par étapes successives jusqu'à l'implémentation du logiciel écrit en langage spécialisé pour la sécurité ADA. L'avantage de cette technique est de pouvoir prouver que chaque étape respecte les spécifications de l'étape précédente dont elle est issue.

Etant donné le gain fonctionnel important, la SNCF pris la décision de l'étendre aux 3 000 cabines de conduite déjà équipées du KVB. La substitution de la nouvelle carte s'est étendue sur 6 mois.

Depuis cette période, une 2^{ème} version intermédiaire a été mise en service et une nouvelle mise au point pour le KVBP.

Pour chaque version du logiciel, une importante procédure de qualification est mise en œuvre après la phase de validation pour l'industriel. Il faut compter de 9 à 12 mois de qualification pour une version de logiciel.

L'évolution de la transmission

La transmission ponctuelle par balise ralentit le débit. C'est pourquoi le KVB a été complété uniquement en zone très dense avec la transmission continue sur deux courtes sections de lignes dans Paris, compte tenu du surcoût (coût doublé au sol et 50% plus cher à bord). Ce sont le KVBP³² sur la partie centrale de la ligne C du RER et à l'étude sur Paris Mantes et le système proche KCVP compatible avec les matériels de la RATP dans le tunnel très chargé entre Châtelet et Gare du Nord des lignes B RATP et D SNCF du RER . Le conducteur n'est ainsi plus tenu d'attendre le franchissement du signal annoncé lorsque celui ci s'est ouvert pour reprendre sa marche normale.

En outre, des balises "X" de proximité ont été installées à partir de la mi 1994 lorsque l'approche à 10 km/h au lieu de 30 km/h était imposée pour des raisons d'implantation du signal.

Les évolutions de la maintenance

La maintenance a été totalement intégrée dans le dispositif avec un fort accent mis sur le retour d'expérience compte tenu du caractère récent et évolutif du système.

La troisième étape du KVB

RFF a procédé à une analyse fine des cas de franchissements de signaux, qui a débouché sur la décision d'un complément d'équipement de quelques signaux portant l'indication carré violet (pour les manœuvres de trains sur voies électrifiées) à partir de 2002.

Par ailleurs, des études sont en cours (2007) pour compléter l'équipement en KVB sur certaines lignes non électrifiées.

³² P pour prolongement

4- Les coûts et le financement

4.1 Le coût de l'investissement

Pour permettre les comparaisons, dans les tableaux ci-dessous comme dans l'ensemble du rapport, les valeurs exprimées en francs ou en euros ont été converties en euros de 2005 en utilisant l'indice des prix du PIB publié par l'INSEE.

Des solutions de contrôle de vitesse performantes et sûres existaient déjà dans les années 1980 (TVM sur les LGV et Sacem sur le RER A en Ile de France), mais leur généralisation sur le réseau aurait été à la fois trop longue et trop onéreuse. En outre, comme le rappelle l'éditorial de la Revue Générale des Chemins de Fer consacrée au KVB³³, "la sécurité a en commun avec la santé de ne pas avoir de prix mais d'avoir un coût. Même si la SNCF, fidèle à sa tradition, était décidée à y consacrer des moyens importants, ils ne pouvaient être illimités".

Il était clair que l'effet d'échelle sur l'ensemble du réseau ferroviaire allait nécessiter des investissements importants durant plusieurs années.

L'étude d'efficacité du KVB menée en 1990 par la SNCF avait estimé les coûts moyens unitaires d'équipement à bord et au sol, supposés constants et à vérifier dès que seraient connues les dépenses réelles, et le coût de l'équipement total du réseau à plus de 4 milliards de francs de l'époque.

Estimation du coût d'équipement du KVB en 1990

	Coût unitaire kF ₁₉₉₀ (k€ ₂₀₀₅)	1 ^{ère} étape GF ₁₉₉₀ (M€ ₂₀₀₅)	Programme total GF ₁₉₉₀ (M€ ₂₀₀₅)
Engins moteurs	318 (61,3)	1,2 (227)	1,9 (368)
Signaux	130 (25,1)	0,7 (144)	2,4 (471)
Total		1,9 (371)	4,3 (839)

Source : SNCF

Le coût d'équipement d'un engin moteur était 1,6 fois celui d'un carré rouge (qui nécessitait l'équipement de 1,54 signaux compte tenu des annonces). Le programme total pour l'ensemble du réseau comptait 12200 carrés rouges et 6000 engins à équiper.

En réalité, les dépenses d'investissement en KVB se sont élevées de 1990 à 2004 à 6,2 GF₂₀₀₀, dont 2,8 (55%) pour les engins moteurs et 3,4 pour l'infrastructure.

Coût constaté du KVB

	Première étape 1990 1995 GF ₁₉₉₁ (M€ ₂₀₀₅)	Deuxième étape 1992 2006 M€ ₂₀₀₅	Programme total 1990 2006 GF ₂₀₀₀ (M€ ₂₀₀₅)
Engins moteurs	1,4 (264)	206	2,8 (470)
Signaux	0,8 (151)	420	3,4 (571)
Total	2,2 (415)	626	6,2 (1041)

Source : SNCF RFF

³³ Revue Générale des chemins de fer. KVB. Le système français de contrôle de vitesse à balises. Editions Delville. Décembre 2000

L'augmentation globale par rapport aux prévisions est de +24% (+28% pour les engins et +21% au sol).

Le tableau ci-dessous résume l'évolution des coûts unitaires moyens.

	A priori	Coûts réels	Ecart
	k€ ₂₀₀₅	k€ ₂₀₀₅	
Engins moteurs	61,3	84,2	+37%
Signaux	25,1	32,7	+31%

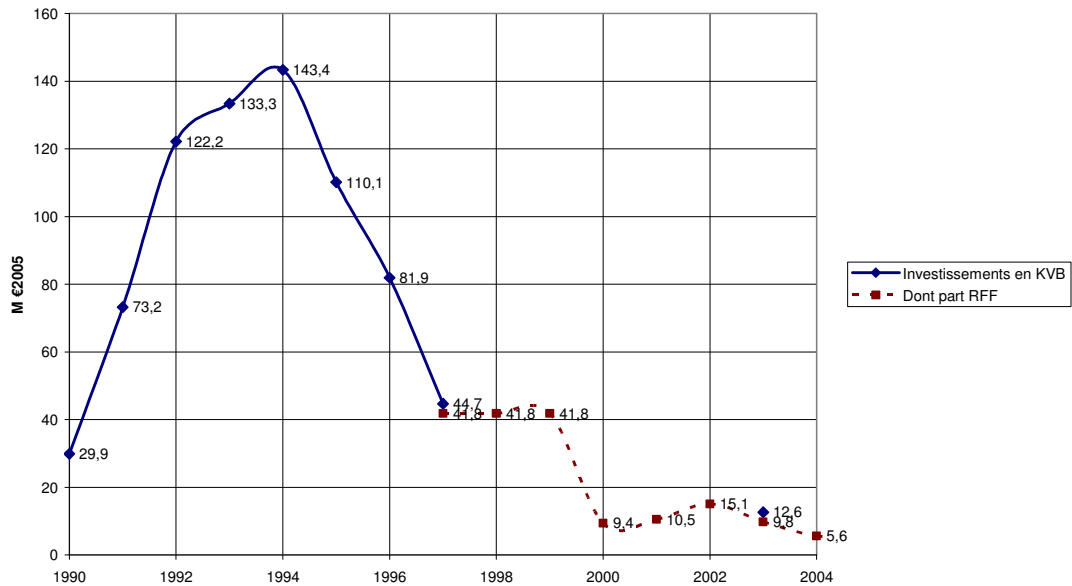
Par rapport aux premières estimations, les coûts unitaires d'installation à bord ou au sol sont en hausse d'un peu plus de 30% en monnaie constante et expliquent l'essentiel de la hausse constatée, compensé par un programme moins important.

La hausse des coûts unitaires moyens d'un peu plus de 30% par rapport aux estimations de 1990 a plusieurs causes. Les prévisions avaient été faites sur des échantillons de séries d'engins moteurs et d'implantations des signaux les plus courantes. Mais l'équipement en KVB du reste du parc de locomotives ou de certaines configurations de signaux, plus complexes, a été plus onéreux. Il n'y avait pas d'expérience acquise ni de référence. Ensuite, la période de déploiement a été très longue, ce qui accroît les incertitudes. Actuellement l'équipement des engins moteurs neufs livrés équipés se fait en usine au coût marginal de 30 ou 40 K€ par engin³⁴.

L'échéancier des dépenses montre que les 3/4 de l'investissement ont été faits de 1990 à 1998.

³⁴ Le coût des installations KVB sur les matériels moteurs étrangers et/ou le coût des installations de systèmes équivalents étrangers demandées par les réseaux voisins à titre de réciprocité est souvent très onéreux car ne concerne que des petites séries.

INVESTISSEMENTS EN KVB

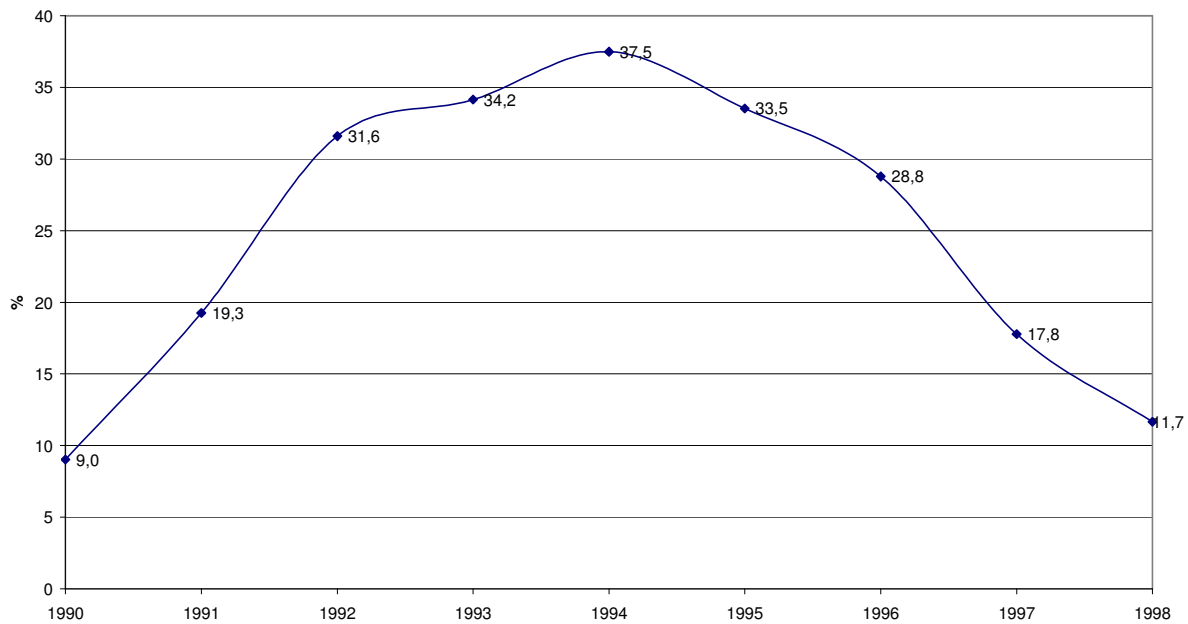


Sources: SNCF et RFF

L'effort des premières années a été très important puisque de 1992 à 1996 le KVB a représenté environ le tiers des investissements de sécurité de la SNCF³⁵. La SNCF a assuré jusqu'en 1997 la maîtrise d'ouvrage et le financement des équipements du KVB à bord et au sol sur ses fonds propres. Depuis cette date, RFF, propriétaire du réseau national, a repris cette mission pour l'infrastructure.

³⁵ Les investissements de sécurité sont assez difficiles à définir car ils ont souvent d'autres fonctions. En 1994, ils se partageaient entre 143,4 M€₂₀₀₅ pour le KVB (année la plus importante) et 239,0 M€₂₀₀₅ hors KVB.

**Part du KVB
dans les investissements de sécurité**



Source: SNCF

Les dépenses d'investissement du KVB ont augmenté de +24% par rapport aux prévisions (1041 M€₂₀₀₅ au lieu de 839 M€₂₀₀₅). L'écart s'explique par la hausse des coûts unitaires, liée à l'incertitude des évaluations initiales, légèrement compensée par un programme moins important.

4.2 Le coût de maintenance

Les dépenses de maintenance peuvent être considérées comme proportionnelles aux nombres annuels cumulés d'engins ou de signaux équipés en KVB.

Les coûts de maintenance au sol ont été estimés par la SNCF à partir des dépenses comptabilisées en 1994 et 1995. Le coefficient de proportionnalité est de 0,0097, ce qui conduit à un coût de maintenance par an et par signal de 317 €₂₀₀₅.

Les coûts de maintenance par an et par engin sont évalués à 2115 F₁₉₉₆ (367 €₂₀₀₅).

Au total, les coûts de maintenance sont par an de l'ordre de 2,1 M€₂₀₀₅ pour les engins moteurs et de 5,5 M€₂₀₀₅ pour les signaux.

Coût annuel de maintenance du KVB

M€ ₂₀₀₅	Equipés	Coût
Engins moteurs	5588	2,1
Signaux	17450	5,5

5- L'amélioration de la sécurité

5.1 La fiabilité et la disponibilité

Le KVB ne peut jouer son rôle de boucle de rattrapage que si chaque sous-système le composant (sol et bord) est en état de fonctionnement et si le paramétrage des caractéristiques du modèle est correctement réalisé.

Les études de sûreté de fonctionnement du KVB menées par la SNCF en 1990 à partir des données fournies par le constructeur ont montré que sa disponibilité était essentiellement conditionnée par le système embarqué (indisponibilité maximale de 0,12% dont 0,093% à bord et 0,017% au sol). Les erreurs de paramétrage des caractéristiques du train par le conducteur ajoutaient 0,01% d'indisponibilité.

La SNCF a mené un audit technique de la situation fin 2003. Il montre que le niveau de disponibilité pour le sol n'atteint pas celui retenu lors de la décision de déploiement, même s'il est du même ordre de grandeur.

En effet, le taux de défaillance d'un point d'information pour la signalisation permanente est de $7 \cdot 10^{-5}$ à $2 \cdot 10^{-5}$ par heure pour un objectif de $2 \cdot 10^{-5}$. Cet objectif est proche d'être atteint pour les signaux de chantier. Les origines de cet écart sont principalement :

- le taux de défaillance du matériel et en particulier celui très élevé des balises numériques installées à partir de 1996 ;
- la sollicitation importante de la maintenance et les problèmes dans l'organisation du travail.

Les mesures correctives mises en œuvre visent à respecter les objectifs. Elles consistent à identifier avec certitude les points d'information en panne et les causes des dysfonctionnements en complétant les bases de données de la SNCF (gestionnaire d'infrastructure délégué) avec les enregistrements des engins moteurs signalant les défauts. Par ailleurs, un programme de remplacement d'environ 14000 balises numériques a été lancé sur trois ans à partir de juillet 2004. L'audit recommande de s'assurer que ces mesures ont été efficaces et que l'indisponibilité du sous-système sol peut être considérée comme négligeable.

Pour les engins moteurs, les objectifs sont atteints. En particulier, la durée maximum de 24 h d'utilisation avec le KVB isolé est respectée. Par ailleurs, tout engin moteur circulant plus d'une heure par jour sur une ligne avec KVB du réseau ferré national doit être équipé du KVB conformément à l'arrêté ministériel du 1^{er} juillet 2004 et à son annexe.

Le retour d'expérience obtenu à partir du suivi opérationnel du KVB sur le réseau ferré national met en évidence une moyenne de 1500 à 1900 freinages d'urgence par mois. Parmi ceux-ci, le KVB a joué son rôle de boucle de rattrapage dans environ 380 situations par mois (risques évités de franchissements de signaux d'arrêt ou de dépassements de vitesse sur une zone de limitation). Dans les autres cas, le freinage d'urgence a diverses causes d'origine conduite (non respect des règles de réouverture, paramétrage du train trop restrictif, etc.) ou système (anomalie).

La proportion de prises en charge par le contrôle de vitesse justifiées par le rôle de boucle de rattrapage est donc de l'ordre de 25%. Tout arrêt intempestif d'un engin peut avoir un effet non négligeable en matière de sécurité, d'image, de confort, de régularité et d'économie d'énergie. L'audit recommande une réflexion transverse des différents services pour limiter au maximum ce type de prise en charge.

Le niveau prévu de disponibilité du KVB est atteint pour les engins moteurs. En revanche, les objectifs retenus lors de la décision de déploiement ne sont pas encore atteints pour le sol. Des mesures correctives ont été décidées, comme le remplacement des séries de balises défaillantes.

5.2 L'efficacité du KVB

Le KVB constitue-t-il un progrès en matière de sécurité?

Après avoir rappelé les objectifs d'origine, nous examinerons l'évolution des franchissements de carrés et les effets sur les dépassements de vitesse.

Dans le rapport réalisé ex ante par la SNCF en 1990 sur la sécurité du KVB, l'efficacité était évaluée par la proportion de franchissements de carrés évités en fonction du nombre de carrés et d'engins équipés. Un groupe d'experts avait analysé individuellement tous les franchissements survenus en 1987 et 1989 afin de déterminer combien d'entre eux auraient été évités dans les différentes hypothèses d'équipement.

Efficacité du KVB parfait³⁶

Scénarios d'équipement	% de franchissements de carrés évités
A 2300 carrés 3600 engins	36%
B 3800 carrés 3600 engins	45%
C 12200 carrés 5000 engins	88%

Source: SNCF

Un modèle mathématique à élasticités constantes type fonction de production Cobb Douglas avait été ajusté avec ces données (l'ajustement était de bonne qualité) :

$$Y = K C^a E^b$$

avec Y pourcentage de franchissement évités

K constante 0,05

C nombre de carrés équipés

a élasticité constante 0,43

E nombre d'engins équipés

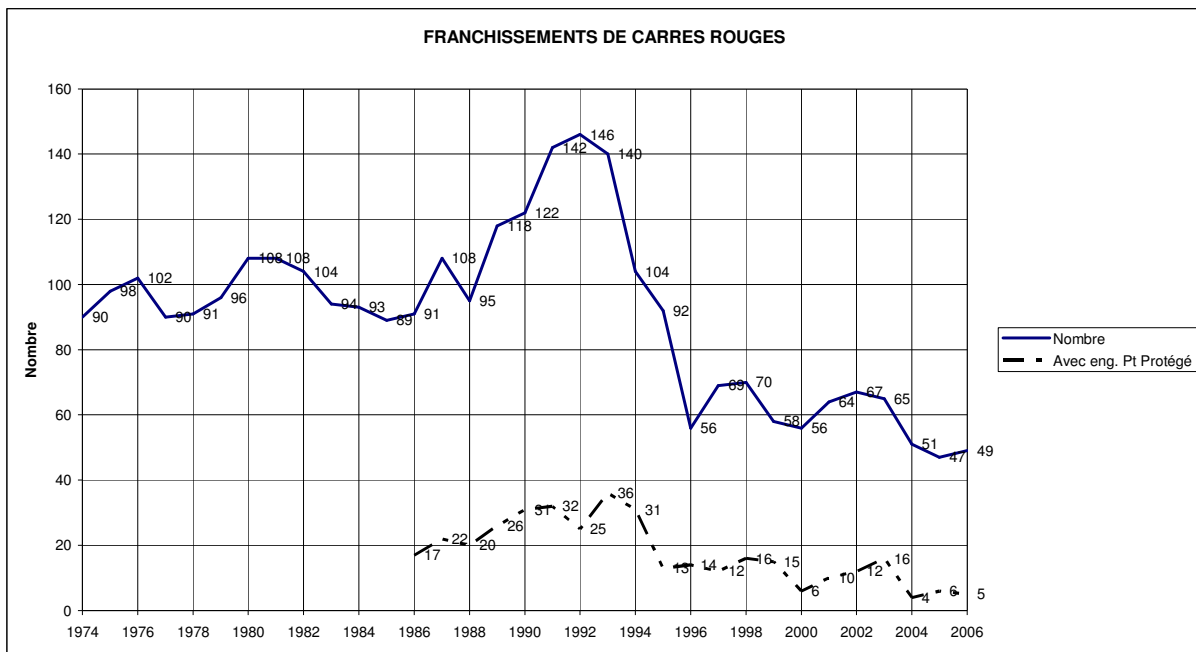
b élasticité constante 0,40

³⁶ Les études montrent que la disponibilité du KVB a peu d'influence sur l'augmentation des risques.

Ce modèle permet de calculer le pourcentage de franchissements évités pour les deux étapes d'équipement décidées.

Equipement en KVB	% de franchissements évités
1 ^{ère} étape 3500 carrés 3700 engins	38%
Programme total 11000 carrés 6000 engins	78%

Les franchissements de carrés rouges, qui sont une cause potentielle d'accidents, avaient augmenté régulièrement durant 20 ans en passant de 90 en 1974 à 140 en 1993. Dès 1994, ils ont diminué de manière spectaculaire, pour s'établir autour d'une moyenne de 65 de 1994 à 2006 (49 en 2006). Le nombre d'engagements du point protégé après franchissement a évolué de manière assez parallèle (5 en 2006). Le graphique ci-dessous montre bien la baisse après 1993.

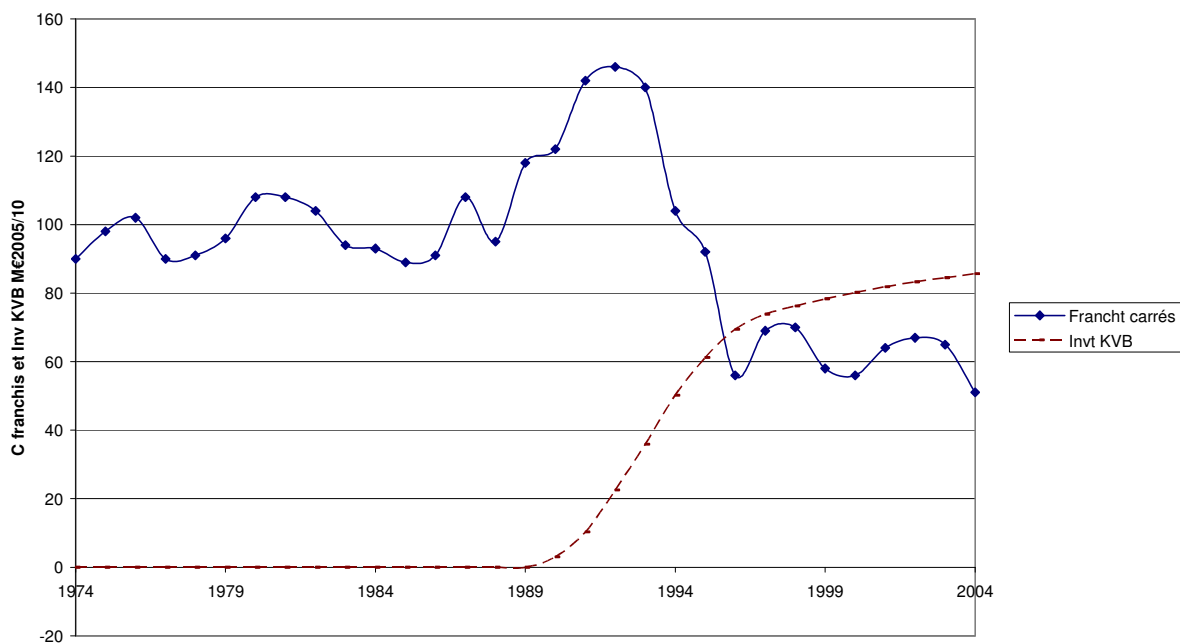


Source: SNCF

Pour vérifier la corrélation de cette amélioration de la sécurité avec l'installation du KVB, deux méthodes ont été utilisées.

D'abord, la courbe des franchissements de carrés a été rapprochée de celle des investissements cumulés en KVB (sol et bord), en choisissant bien les échelles. Le nombre de franchissements diminue dès le déploiement du KVB, assez rapide au début dans la période 1990-1994.

Efficacité du KVB



Source: SNCF Calculs RFF

Ensuite, un test statistique de comparaison des moyennes des franchissements de carrés a été réalisé pour s'assurer que la baisse constatée entre les périodes 1974 1993 et 1994 2006 est bien significative et ne résulte pas des aléas propres à la série. Aux seuils de confiance de 5% et de 1%³⁷, la série des carrés franchis après 1993 est significativement différente de celle de la période précédente, avant mise en place du KVB. La diminution est de 41 franchissements par an soit - 39%.

³⁷ En toute rigueur, les effectifs des deux échantillons comparés devraient être supérieurs à 30.

Franchissements de carrés rouges
Test de comparaison des moyennes 1974-1993 et 1994-2006

On teste l'hypothèse nulle H0

Moyenne FC 74 93 - moyenne FC 94 2006=0

	Effectif	Moy FC	Ecart type FC	
74-93	20	106	18	
94-2006	13	65	17	

La différence des moyennes suit une loi normale de moyenne nulle et d'écart type **6,14**

Intervalle d'acceptation de H0 au seuil de 5%	-12,03	12,03
Intervalle d'acceptation de H0 au seuil de 1%	-15,84	15,84
Différence observée	41	

Elle est située à l'extérieur de l'intervalle de confiance et donc significative.

La comparaison des séries de franchissements de carrés avec engagement du point protégé permet de préciser la diminution du risque réel d'accident. Avec le KVB, le nombre moyen par an d'engagements du point protégé baisse de 14, soit -53% contre -39% pour les franchissements de carrés rouges. C'est que, dans certains cas, l'intervention du KVB ne supprime pas le franchissement du signal mais elle supprime le risque en évitant l'engagement du point protégé.

	Franchissements carrés		Avec eng. PP
Moyenne 74-93	106	Moyenne 86-93	26
Moyenne 94-06	65	Moyenne 94-06	12
Diminution	-38,6%	Diminution	-52,9%

Mais le test statistique de comparaison des moyennes avant et après KVB n'est pas significatif car la taille de l'échantillon (période 1986-2006) est trop faible. Par ailleurs, cette évaluation suppose qu'en situation de référence (sans KVB), le nombre de franchissements de carrés serait resté stable.

Ces résultats sont de l'ordre des prévisions, si on prend en compte la baisse des engagements du point protégé (-53%). Ils correspondent à une moyenne entre les niveaux d'équipement de 1994 un peu avant la fin de la 1^{ère} étape et le niveau actuel proche du programme total envisagé.

Les dépassements de vitesse limite sont dus au non respect de la signalisation latérale ou aux limitations liées au train. L'audit réalisé par la SNCF et déjà cité montre que de 2001 à 2003 le KVB a joué son rôle de boucle de rattrapage dans environ 7300 situations potentiellement dangereuses (limitations permanentes ou temporaires de vitesse). Mais l'approche statistique dans ce domaine est plus difficile que pour les franchissements de carrés.

En résumé, la corrélation entre la baisse importante du nombre de franchissements de carrés rouges et l'installation du KVB, qui interviennent simultanément, est clairement établie. Par ailleurs, aucun accident grave lié à un franchissement de carré rouge n'a eu lieu depuis celui de Melun en 1991.

Mais d'autres causes d'amélioration de la sécurité ont pu jouer. Citons :

- les plans de prévention "franchissement signal d'arrêt" dans les établissements traction de la SNCF à partir de 2003
- la diminution du trafic sur les lignes classiques due aux LGV et à la baisse du fret. L'encadré ci-dessous montre que la concentration du trafic sur lignes classiques a au contraire augmenté dans les nœuds critiques (ainsi que le trafic depuis 1994). L'évolution du trafic ne peut donc expliquer la diminution du nombre de carrés franchis.

L'évolution du trafic sur les lignes classiques (hors LGV)

Le trafic sur les LGV a fortement augmenté durant la même période, à partir de 1994, en soulageant les lignes classiques où se produisent les franchissements de carrés (mises en service des LGV Nord, Jonction et Rhône Alpes). Mais l'influence du trafic mesuré en trains-km sur lignes classiques n'est pas forcément un bon indicateur du nombre de signaux rencontrés fermés et donc du risque potentiel. Les conflits de circulation (qui expliquent les carrés rencontrés fermés) proviennent de la concentration du trafic dans certains nœuds critiques à certaines heures.

Ce point peut être développé avec trois constats.

D'abord, l'analyse du nombre de circulations sur le réseau ferroviaire classique montre une baisse globale depuis 1980. Elle s'explique bien par la suppression de circulations voyageurs classiques remplacées par des rames TGV, mais aussi par l'augmentation du tonnage moyen par train de fret (20% environ) et par la baisse du trafic de fret. Ainsi, de 1980 à 2000, le nombre de circulations ferroviaires contournant l'agglomération parisienne (essentiellement sur la grande ceinture fret) a diminué de 37%. Durant la même période, ce nombre a baissé également de 18% sur les lignes radiales sans TGV. Mais il a augmenté de 6% environ sur les lignes radiales avec TGV.³⁸



Source : SESP

Ainsi, le réseau classique est globalement moins utilisé et les LGV n'expliquent qu'une partie du phénomène. Mais paradoxalement, il pose pourtant des problèmes de capacité.

C'est le deuxième constat. La diminution du trafic des trains voyageurs de nuit (de plus en plus hors marché du fait

³⁸ Voir Notes de synthèse du SESP mai juin 2003 L'évolution de la capacité utilisée dans les maillons critiques du réseau ferroviaire classique de 1980 à 2000. Alain Sauvant

des TGV et des baisses de prix du transport aérien notamment), et le renforcement des dessertes régionales expliquent la concentration des circulations dans la journée et les problèmes dans certains endroits congestionnés. Les trains du transport combiné, qui forment une bonne part de la demande nouvelle, augmentent les contraintes avec des sillons et des exigences horaires proches de ceux des trains de voyageurs. Cette évolution de la répartition de la demande, plus concentrée, et l'hétérogénéité accrue des vitesses constituent des facteurs de tension sur la capacité dans certains noeuds critiques.

Enfin, les capacités dégagées par les LGV sur les lignes classiques ont été utilisées par les trains régionaux TER ou des missions de couverture du territoire (Corail) mais pas par le fret. Ceci explique la hausse du trafic depuis 1994. La baisse des circulations marchandises est de 32% en moyenne sur la période 1980 à 2004 sur les radiales TGV comme sur les autres radiales, que le trafic global se soit maintenu ou pas (on rappelle que l'effet des mises en service des LGV a été en général de réduire la demande de sillons sur la ligne parallèle à la LGV, mais en revanche de l'accroître sur les radiales du réseau classique empruntées par les LGV).

Ces résultats d'amélioration de la sécurité certainement liés pour l'essentiel au KVB laissent penser que les modifications inévitables du comportement des conducteurs ont été maîtrisées et que le KVB constitue bien une boucle de rattrapage conformément aux objectifs de départ.

Le KVB constitue un progrès en matière de sécurité. Le nombre de franchissements de carrés rouges a baissé en moyenne de 39% et le nombre d'engagements du point protégé, qui représente le risque réel d'accident grave, de 53%. Aucun accident grave lié à un franchissement de carré n'a eu lieu depuis 1991.

6- Le bilan économique pour la collectivité

D'après le décret de juillet 1984, le bilan LOTI doit comporter l'estimation d'un taux de rentabilité pour la collectivité tenant compte d'éléments non inclus dans le coût des transports, telle justement la sécurité des personnes. Il peut être établi sur la base de grandeurs physiques ou monétaires.

En 1990, le rapport sur le KVB de la SNCF (intégrée à l'époque c'est-à-dire gestionnaire d'infrastructure et transporteur) avait le mérite d'être très novateur et de montrer qu'il était possible de quantifier la sécurité et d'aborder les aspects économiques. Mais, s'il a fourni des prévisions de franchissements de carrés évités, il n'a pas calculé la rentabilité collective de l'opération. Le calcul économique n'a pas été utilisé pour prendre la décision de mettre en place le KVB.

En revanche, des études ultérieures de la SNCF mesurent la valeur implicite de la vie humaine épargnée issue des dépenses faites pour le KVB. Cette valeur s'avère être bien supérieure aux valeurs tutélaires de la vie retenues en France dans les transports collectifs : 0,55 M€₁₉₉₃ après 1995 et 1,5 M€₂₀₀₀ depuis 2004³⁹ (1,0 M€₂₀₀₀ pour les projets routiers) pour évaluer les investissements publics.

En 1992, la SNCF a estimé le coût du mort évité à une valeur légèrement supérieure à 100 MF₁₉₉₂ (18,5 M€₂₀₀₅). Cette valeur a été révisée à 90 MF₁₉₉₆ en 1998 (15,6 M€₂₀₀₅). La méthode consiste à calculer la valeur actualisée nette des dépenses et des économies (au taux de 8% hors inflation) sur la période d'amortissement envisagée, soit 20 ans (sans retenir de valeur résiduelle en fin de période), et à la ramener au nombre de morts évités. Les dépenses sont les investissements au sol et à bord, les coûts d'exploitation (proportionnels au nombre d'unités de KVB en service au sol ou à bord), les coûts de maintenance au sol proportionnels à l'investissement et les coûts de maintenance (préventive et curative) dans les engins. Les avantages sont les indemnités que l'entreprise ne devrait plus payer. Ils sont déterminés à partir du nombre de morts évités (issu du rapport de la SNCF de 1990 soit 4,35 morts par an⁴⁰ quand le déploiement du KVB sera achevé) et des indemnités moyennes versées par décès (1,18 MF₁₉₉₆ ou 0,205 M€₂₀₀₅).

Le bilan a posteriori a été effectué avec la même méthode. Les investissements et leur échéancier (plus étalé dans le temps)⁴¹ sont ceux constatés. Il conduit à une valeur implicite du mort évité par le KVB de **11,5 M€₂₀₀₅**⁴². Si on considère que la durée de vie du KVB est en réalité de 35 ans au lieu de 20 ans, compte tenu des prévisions actuelles de remplacement du système, et que l'on prend en compte la valeur résiduelle au bout de 20 ans, le coût du mort évité est de l'ordre de **8,1 M€₂₀₀₅**, soit un peu plus de 5 fois la valeur tutélaire actuelle.

³⁹ Voir le rapport du groupe du Plan présidé par M.Boiteux Transports : choix des investissements et coût des nuisances. La Documentation française. Juin 2001.

⁴⁰ Cette estimation est fondée sur l'analyse de tous les accidents mortels de circulation à la SNCF de 1957 (après la reconstruction) à 1989 (pour l'étude du KVB). Le KVB aurait évité (si son déploiement était achevé) 4,35 morts par an en moyenne. En première approximation, le nombre de blessés n'a pas été pris en compte.

⁴¹ La seconde étape du KVB (1992 2005) s'est étalée sur près de 15 ans au lieu de 6 ans.

⁴² Cette valeur implicite serait de 14,4 M€₂₀₀₅ avec le taux d'actualisation des investissements publics de 4% retenu actuellement.

Le tableau ci-dessous résume les principaux résultats.

KVB			
Coût implicite de la vie humaine épargnée			
A priori (1992)	Révision (1998)	A posteriori (Sans valeur résiduelle)	A posteriori (Avec valeur résiduelle)
18,5 M€ ₂₀₀₅ (100 MF ₁₉₉₂)	15,6 M€ ₂₀₀₅ (90 MF ₁₉₉₂)	11,5 M€ ₂₀₀₅	8,1 M€ ₂₀₀₅

Les effets négatifs du KVB sur la régularité des trains et sur la capacité des lignes ont été évalués par plusieurs méthodes à environ 30 M€ en 2005 avec l'équipement complet en KVB. Ils sont vraisemblablement du même ordre de grandeur que les effets positifs des accidents évités sur l'image et le trafic ferroviaire. Le KVB n'a pas d'autre bénéfice que l'amélioration de la sécurité, à la différence d'autres investissements comme la radio sol train qui combine productivité et sécurité puisqu'elle supprime le 2^{ème} agent sur les trains de fret⁴³.

Cette question des effets négatifs et positifs du KVB, au-delà de l'amélioration de la sécurité, reste une piste de recherche et les marges d'erreur des calculs sont importantes. Par exemple, les effets des accidents sur la fréquentation et les recettes commerciales n'ont jamais fait l'objet d'une analyse systématique.

L'encadré suivant résume les calculs.

Effets positifs et négatifs du KVB au-delà de l'amélioration de la sécurité

Les effets négatifs. La diminution de capacité des lignes équipées doit être prise en compte dans le bilan du KVB car elle diminue les avantages de l'opération. La perte est dans une fourchette de 10 à 15% du débit aux heures de pointe suivant la catégorie de trains (banlieue parisienne, grandes lignes, fret). L'estimation est faite à partir des normes de tracé (20 secondes supplémentaires entre trains) et sur la base de la diminution de deux sillons environ sur 20 par heure.

L'effet est le plus sensible en Ile de France. Trois méthodes peuvent être utilisées pour chiffrer dans le bilan l'ordre de grandeur de la perte de capacité. Les deux premières sont fondées sur le coût des dommages et la troisième sur le coût d'évitement :

- La perte de débit peut-être approchée par la valeur annuelle des péages des 10% de sillons perdus en heures de pointe soit 30M€ environ par an (550M€ de péages des trains Transilien par an au coût complet et 300M€ en pointe).
- On pourrait aussi valoriser le temps perdu par les voyageurs puisque la diminution du débit doit dégrader la ponctualité, mais les données ne sont pas disponibles (des calculs approchés fondés sur le trafic total en France de 900 millions de voyageurs par an perdant 10 secondes conduisent au même ordre de grandeur).
- La troisième méthode (coût d'évitement) consisterait à estimer le montant des travaux (investissements d'infrastructure, KVBP, refonte des graphiques, etc.) pour rétablir les 10% de capacité perdus en heures de pointe, mais elle est difficile à mettre en oeuvre.

⁴³ Le KVB permet néanmoins la circulation et le contrôle de la vitesse des trains circulant à plus de 160 km/h (jusqu'à 200km/h et même 220 km/h) et remplace de ce fait le système de contrôle de vitesse précédent (répétition des signaux par balises) obligatoire pour ces trains. Cette économie, non chiffrée, est du 2^{ème} ordre. Par ailleurs, l'installation récente du contrôle de vitesse SCMT sur le réseau italien permet de supprimer le 2^{ème} agent des trains.

Les effets négatifs du KVB sur la régularité des trains et sur la capacité des lignes seraient donc d'environ 30 M€ en 2005 avec l'équipement complet en KVB. Mais cette évaluation reste assez imprécise.

Les effets positifs de la sécurité des circulations sont également difficiles à évaluer, compte tenu de l'insuffisance des informations et des études.

On ne connaît pas les pertes de trafics provoquées par un accident grave. Elles ne sont certainement pas négligeables. En Grande Bretagne, le constat avait été fait que l'accident de Charing Cross dans le métro londonien en 1989 avait effectivement diminué la fréquentation.

Les pertes de temps et les perturbations de circulation après un accident grave sont considérées comme négligeables.

Les accidents catastrophiques ont également un impact médiatique important. Ils affectent l'image des entreprises et diminuent la valeur de leur marque, qui constitue un actif immatériel de leur patrimoine. Ce coût médiatique avait été estimé par la SNCF après l'accident de Melun de 1991 (16 morts) en partant du principe que les informations diffusées par les différents médias avaient le même coût que des publicités diffusées de la même manière. L'estimation était du même ordre de grandeur que le coût matériel de l'accident, soit 12,5 M€.

Sur ces bases, sans compter les économies d'indemnités aux victimes que la SNCF ne devrait plus payer puisqu'elles constituent un transfert et avec une valeur de la vie humaine épargnée de 1,5 M€, le TRI pour la collectivité est négatif. Il serait de l'ordre de 5,8% avec une valeur du mort 10 fois supérieure de 15 M€⁴⁴. Ce taux de rentabilité reste inférieur au seuil de rentabilité collective fixé à 8% par l'ex Commissariat du Plan pour les investissements publics au moment de la décision de réalisation⁴⁵ (taux réels hors inflation).

Ces résultats sont conformes au constat que le coût du mort évité correspondant aux investissements de sécurité des secteurs aériens et ferroviaires est généralement beaucoup plus élevé que les valeurs tutélaires de la vie pratiquées dans les différents pays, pour la route en particulier. En comparant ces valeurs, Quinet et Galland (1995)⁴⁶ arrivent à la conclusion que la valeur de la vie humaine en transports en commun peut être 1 à 10 fois supérieure pour plusieurs raisons.

Citons, outre des aspects plus techniques :

- la responsabilité de la victime (en automobile, les usagers peuvent choisir leur niveau de risque par leur style de conduite ; ce sont les moins sensibles au risque, c'est-à-dire ceux dont la valeur de la vie humaine est la plus faible qui ont le plus d'accident) ;
- l'effet de contexte (accident en tunnel, accident de masse) ;
- les différences de revenus ou de catégories socio professionnelles ;
- les biais liés à la gouvernance du système (le mécanisme de prise de décision dans le système ferroviaire semble conduire à adopter des mesures de sécurité au-delà de ce que la disposition à payer des usagers justifierait).

⁴⁴ Le rapport du groupe du Plan présidé par M.Boiteux (1994) préconisait de compléter les études économiques par un calcul de sensibilité avec une valeur du mort dans les transports collectifs quinze fois supérieure à la valeur retenue pour la route, soit ici 15 M€.

⁴⁵ Le rapport Lebègue du Plan (2005) a ramené ce seuil à 4% (sans les risques).

⁴⁶ Rapport pour le compte du ministère de l'Équipement DTT ENPC CERAS E Quinet et C. Galland 1995.

Certains de ces motifs justifient que la valeur retenue dans les calculs économiques soit supérieure à celle prise dans le mode routier, d'autres, en particulier le système de gouvernance, non. Les calculs effectués tombent au milieu de la fourchette de ces auteurs.

Ceci explique la valeur négative du TRI socio-économique. Cet investissement de sécurité a été décidé avec les pouvoirs publics après une série d'accidents et on le referait certainement d'une manière ou d'une autre (assistance au conducteur par des automatismes pour réduire les conséquences d'une erreur humaine). La décision n'a pas été prise sur la base d'une analyse socio économique explicitée.

La situation de référence (sans KVB) est d'ailleurs difficile à définir. On pourrait se référer aux autres pays européens. Il n'existe cependant pas d'étude identifiée de benchmarking du contrôle de vitesse en Europe, à l'exception de tableaux récapitulatifs de l'UIC⁴⁷. Mais plusieurs réseaux sont équipés de systèmes comparables. C'est ainsi que le gestionnaire des infrastructures belge Infrabel vient de décider l'installation d'un contrôle de vitesse comparable pour 300 M€ environ. La moitié du réseau devrait être équipée à la fin 2009 et le reste à l'horizon 2012.

La circulaire ministérielle de 1995 (circulaire Idrac) sur les méthodes d'évaluation des projets retenait une étude de sensibilité multipliant par 15, pour les transports en commun, la valeur retenue pour la route. Elle traduit la nécessité pour les transports collectifs d'être plus sûrs que les transports individuels.

La circulaire ministérielle de 2004 (dite Robien actuellement en vigueur) retient une valeur de la vie humaine de 1 M€ pour la route et de 1,5 M€ pour les projets de transport collectif. Mais elle ajoute que, là où pour des raisons d'image un degré supérieur de sécurité est estimé nécessaire, il conviendra, pour optimiser et rationaliser la programmation des actions destinées à améliorer la sécurité, de calculer la valeur implicite de la vie humaine afférente à chacune de ces actions.

La décision de mettre en place le KVB n'a pas été prise sur la base d'une analyse socio économique explicitée. La valeur implicite du mort évité par le KVB est de l'ordre de 8,1 M€₂₀₀₅, soit un peu plus de 5 fois la valeur tutélaire actuelle. Cet investissement de sécurité a été décidé avec les pouvoirs publics après une série d'accidents. Ces résultats sont conformes au constat que le coût du mort évité correspondant aux dépenses des secteurs aériens et ferroviaires est généralement beaucoup plus élevé que les valeurs tutélaire de la vie pratiquées dans les différents pays, en particulier que celles retenues pour la route.

⁴⁷ Union internationale des chemins de fer

7- Remarques méthodologiques

Les bilans LOTI ont deux objectifs principaux : l'information du public et l'amélioration des méthodes.

Jusqu'en 2001, le seul bilan LOTI réalisé concernant une infrastructure ferroviaire était celui du TGV Atlantique⁴⁸. RFF a été désigné en 2003 pour réaliser tous les bilans LOTI ferroviaires, y compris ceux des opérations menées par la SNCF avant RFF en 1997.

La présente évaluation a posteriori d'un investissement de sécurité est réalisée au titre d'un grand choix technologique d'un coût supérieur à 16,6M€ (au lieu de 83,1M€ pour les grands projets d'infrastructure). Elle n'a guère de précédent, à l'exception de celle faite par le CGPC il y a plus de 10 ans en 1996 pour le système d'exploitation et d'information routière en Ile de France (Sirius).

Ce rapport vise à contribuer au retour d'expérience, à la fois pour les futurs bilans des grands choix technologiques comme celui du système de radiocommunications numérique GSM-R destiné à remplacer à l'horizon 2014 la radio sol train analogique et pour les méthodes d'analyses coûts bénéfiques qui peuvent contribuer à optimiser les investissements de sécurité et à prévenir les risques.

Les enseignements pour les futurs bilans LOTI

Moment de la réalisation

Le rapport du CGPC de septembre 2002 et l'avis de juin 2003 ont recommandé de respecter l'obligation de réaliser les bilans trois à cinq ans après les mises en service et fournissent des principes et des méthodes de travail. Les deux étapes d'équipement du réseau national en KVB se sont achevées en 2006. Mais, comme l'essentiel du déploiement prévu était fait en 2000, la date de réalisation de ce bilan paraît à l'expérience un bon compromis. La réalisation a été plus facile, car les acteurs ayant la mémoire de l'opération étaient encore en poste et les archives plus accessibles. Ainsi, une première version du rapport a été établie après des réunions avec la SNCF dès la fin de 2004.

Suivi des éléments du bilan

La collecte des informations nécessaires doit être organisée par le maître d'ouvrage dès la réalisation du projet. Pour les opérations réalisées avant 1997, date de création de Réseau Ferré de France, la SNCF fournit les dossiers des études ayant servi de base au lancement du projet et les données sur la situation a posteriori.

Les travaux d'élaboration du bilan ont montré que la recherche des documents, des hypothèses et des modalités de calcul n'allait pas de soi et que la qualité de l'archivage conditionnait la bonne réalisation. La SNCF a pu fournir l'essentiel des informations nécessaires après un effort assez important dont elle doit être remerciée.

Le recueil des données a posteriori nécessite la mise en place d'un suivi avec des indicateurs mesurables ex post. L'instruction ministérielle du 27 mai 2005 a d'ailleurs complété dans ce sens l'instruction - cadre du ministre de l'Équipement du 25 mars 2004 relative à l'évaluation des

⁴⁸ Etabli par la SNCF. Voir le bilan LOTI du TGV Atlantique (CGPC 2001)

grandes infrastructures, en rappelant la nécessité de ce suivi des éléments de base du bilan a posteriori dans la vie du projet.

Les données concernant les retombées économiques et industrielles du KVB (emplois, exportation, etc.) sont difficiles à recueillir. Elles ont fait l'objet d'un entretien avec Alstom, industriel qui a fourni les équipements du KVB. L'encadré suivant montre que ces retombées, qui ne figuraient pas dans les objectifs de départ, sont assez modestes.

Retombées économiques et industrielles du KVB

La fabrication par Alstom et le déploiement par la SNCF avec ses moyens propres se sont étalés sur 17 ans. Les effets sur l'ingénierie (brevets) sont mineurs, puisque le système balise antenne a été développé pour le contrôle de vitesse en Suède par Ericsson, qui a ensuite vendu ses licences.

Sur la période, le chiffre d'affaires d'Alstom pour le KVB sol et bord est de 360 à 380 M€. Les emplois directs d'Alstom pour le KVB sont en moyenne à 60 par an, soit 1 000 environ pour toute la période. Durant la première étape d'équipement de 1989 à 1995, le nombre d'emplois s'est élevé jusqu'à 150 ou 200 par an. A partir de 1998, la fabrication des balises a été sous-traitée à NCF en région parisienne (Argenteuil).

Actuellement, le flux de renouvellement au sol et d'équipement des engins moteurs neufs (y compris pour les opérateurs privés de fret) est faible (par an, 2M€ pour l'infrastructure avec 2500 balises au titre de la régénération ou d'opérations « travaux neufs » et 8 à 10 M€ à bord).

Au fil des années, Alstom a également développé la partie logiciel informatique du KVB, à partir des premières versions de Jeumont Schneider en 1986. Il a aussi industrialisé avec la SNCF le KVBP (P pour prolongement) pour les lignes RER C dans Paris et le tunnel de la Gare de Lyon – Châtelet. Le chiffre d'affaires pour Alstom de ces opérations représente 5 à 10 M€ au global et 8 à 10 ingénieurs par an.

La maîtrise de ces technologies innovantes de différentes parties du KVB (logiciels de sécurité, processeurs codés, etc.) a sans doute aidé Alstom, par le retour d'expérience, à développer le nouveau contrôle de vitesse interopérable ERTMS. En revanche, l'émergence de ce nouveau système européen a pour l'heure handicapé l'exportation du système KVB. Seule une opération pour le compte d'Amtrack (liaison Boston – Washington) a pu être conduite à l'exportation.

Dossier a priori pour la mesure des écarts avec la réalité constatée

A la différence des bilans LOTI des grands projets d'infrastructure, il n'y a pas de dossier d'enquête publique auquel se référer pour mesurer les écarts entre les réalisations et les objectifs annoncés. Par ailleurs, le KVB n'a pas donné lieu a priori à une étude socio économique explicitée, avec un bilan des avantages et des inconvénients des choix retenus et un taux de rentabilité pour la collectivité. C'est donc une étude d'efficacité du système menée ex ante par la SNCF en 1990 pour optimiser les investissements au sol et à bord qui a été utilisée comme référentiel.

Présentation

La logique de transparence de la loi impose de réaliser des documents simples et accessibles à tous avec des comparaisons claires entre les prévisions et la réalisation. En revanche, le souci de valoriser et de diffuser le retour d'expérience pousse à des développements plus techniques. Le présent rapport a tenté un compromis entre ces deux contraintes.

Les enseignements concernant les méthodes d'évaluation

Des questions méthodologiques sont apparues au sujet de l'analyse coûts bénéfiques du KVB et le comité scientifique mis en place par RFF a été consulté. Elles concernent surtout la valeur statistique de la vie et l'évaluation des effets positifs et négatifs du KVB.

La valeur implicite de la vie humaine épargnée par le KVB est supérieure à la valeur tutélaire retenue en France pour les transports collectifs (8,1 M€₂₀₀₅ au lieu de 1,5 M€₂₀₀₀) et à celle pour la route (1,0 M€₂₀₀₀). Ce résultat est conforme au constat que le coût du mort évité correspondant aux investissements de sécurité des secteurs aériens et ferroviaires est plus élevé que les valeurs de la vie pratiquées pour la route. Ces valeurs calculées a posteriori traduisent l'attitude effective de la collectivité vis-à-vis des risques. Le rapport énumère les principales causes d'écarts (responsabilité de la victime, effet de contexte, différences de catégories socio professionnelles, gouvernance du système). Certains de ces motifs justifient que la valeur retenue dans les transports collectifs soit supérieure à celle prise dans le mode routier, d'autres non. A propos de l'effet de contexte (crainte des accidents de masse), M.Gaudry⁴⁹ a effectué des recherches sur ces aspects psychologiques de la sécurité et sur la dépendance de l'utilité non seulement à l'égard de la moyenne et de la variance de la distribution des accidents par gravité, mais aussi à l'égard de l'asymétrie de la distribution (3^{ème} moment) qui est nettement plus élevée pour les transports collectifs que pour les transports individuels.

L'analyse coûts bénéfiques du KVB qui pouvait sembler trop technique dans un rapport destiné au public s'avère au contraire très utile, comme dans les autres bilans LOTI. Elle oblige à passer en revue l'ensemble des caractéristiques de l'opération et à les mesurer. En revanche, elle se heurte à l'absence d'information et à la difficulté d'évaluer les ordres de grandeur des effets négatifs (pertes de capacité) et positifs du KVB autres que de sécurité (impacts médiatiques, pertes matérielles et de trafics évitées par exemple). On ne peut que recommander des recherches sur ces questions, en particulier sur les effets des accidents graves sur les trafics et la valeur des marques des entreprises.

⁴⁹ Gaudry, M., "Life, Limb and Bumper Trade-Offs Calculable from Road Accident Models: a Note on a Multimoment Portfolio Analysis and Life Asset Pricing Model (LAPM)", *Transport Reviews* 26, 4, 501-520, 2006.