« Contrôle de vitesse des trains par balises: KVB ».
Bilan LOTI
Avis du Conseil Général des Ponts et Chaussées
Mars 2008

I. Introduction

L'article 14 de la LOTI[1] prévoit que les choix technologiques d'un montant supérieur à 16,6 millions € réalisés avec le concours de financements publics doivent faire l'objet d'un bilan entre 3 et 5 ans après l'achèvement du projet et rendu public après avis du CGPC en application de l'art 9 du décret n°84-617 du 17 juillet 1984.
Le contrôle de vitesse des trains par balise (KVB) entre dans cette catégorie car d'un coût supérieur à 1 milliard d'€. Bien qu'achevé seulement en 2006, mais avec une première étape en 1995, RFF maître d'ouvrage ayant repris les droits et obligations à la SNCF en 1997, a considéré qu'il était judicieux de ne pas attendre 2011 pour établir ce bilan[2].
Celui-ci a donc été établi sous l'égide de RFF et de la SNCF, maîtres d'ouvrage, avec l'appui d'un comité d'experts pour veiller à la rigueur de la méthodologie. Ce rapport a été adressé le 20 février 2008 au CGPC qui a désigné le 28 février 2008, messieurs Philippe Peyronnet et Frédéric Rico en tant que rapporteurs afin d'établir le présent avis.

II. Rappel de l'historique et de la consistance du projet

II.1 Pourquoi un contrôle de vitesse des trains ?

Au cours des années 1980, la SNCF a fait le constat que 20% des accidents graves étaient consécutifs à un franchissement de signal d'arrêt fermé et qu'il n'était plus possible de faire baisser le nombre de franchissements de ces signaux en améliorant seulement la formation des conducteurs. Après les accidents d'Argenton sur Creuse et de Noveant, la SNCF décide de tester le contrôle de vitesse suédois par balise, qu'elle expérimente de 1987 à 1989 sur la ligne Paris-Le Havre. Après l'accident de la gare de Lyon en 1988 et mise au point d'un programme global au cours de l'année 1989, ce programme est approuvé début 1990 par son conseil d'administration. La nécessité d'un déploiement rapide d'une première étape à échéance de 1995 est confirmée par la commission d'enquête ministérielle de l'accident de Melun en 1991. En 1992, la SNCF décide avec l'accord du ministre chargé des transports d'une seconde étape de généralisation.

II.2 Les objectifs recherchés:

Il s'agit d'un système de contrôle de vitesse du train avec transmission ponctuelle par balise et visualisation en cabine d'informations d'aides a la conduite. L'objectif est de se prémunir contre les franchissements de signaux d'arrêt fermés et le non respect des limitations de vitesse.
Deux principes ont guidé la conception de ce système:

- Il doit rester transparent pour le conducteur tant que celui ci respecte les règles de conduite; à la différence des systèmes sur les lignes a grande vitesse ou sur le métro, le système n'est pas « de sécurité ». Dans le langage utilisé par la SNCF. ceci signifie que le système n'est pas monté en série avec le conducteur dans la boucle opérationnelle, il est monté en parallèle. Il faut donc que le conducteur et le système soient simultanément défaillants pour que survienne un franchissement. Un tel système doit être considéré comme un « filet de sauvegarde », il est donc

1 Article 11 du décret 84-617 du 17 juillet 1984 en application de l'article 12 de la LOTI.
2 En toute rigueur, un bilan de la première tranche aurait pu être réalisé entre 1998 et 2000, soit au plus tard 5 ans après la fin de la première tranche.

impératif que sa mise en oeuvre ne modifie pas le comportement opérationnel du conducteur.
- Il doit permettre un équipement progressif du réseau pour obtenir un maximum d'efficacité avec un minimum de signaux équipés; la transparence vis a vis du conducteur contribue à cette progressivité en évitant, dans le domaine de la sécurité, de perdre dans les zones sans KVB, ce qu'on gagne dans les zones équipées.

II.3 Brève description technique et adaptation au cours du temps:

Le KVB est constitué d'un « système sol » et d'un « système bord »:
- Le système sol transmet depuis le sol en des points particuliers via des balises implantées dans l'axe de la voie les informations émanant d'un appareil appelé « codeur », qu'il s'agisse de l'état des signaux ou de la vitesse limite à respecter.
- Le système bord est constitué d'une antenne qui recueille les informations des balises, d'un calculateur de contrôle et d'un écran de visualisation.

Au cours de son déploiement, le KVB a connu plusieurs évolutions significatives:
- Basculement à partir de 1996 d'une technologie analogique pour le système sol vers une technologie numérique, les systèmes embarqués pouvant lire les deux types de messages, facteur de réduction du nombre de balises et de moindre encombrement des armoires au sol.
- Introduction, à partir de 1994, de balises supplémentaires (« balises X») permettant à un conducteur, lorsque l'implantation d'un signal par rapport à un point protégé impose une vitesse d'approche réduite à 10km/h au lieu de 30km/h, de ne pas descendre sa vitesse à 10km/h avant d'être à 150 m du signal en question, ce qui évite de trop diminuer le débit des lignes.
- Développement dans les zones très denses du KVBP (prolongement) sur la ligne C du RER et le du KCVP dans le tunnel entre gare du nord et Châtelet, compatible avec les systèmes RATP (RER B et D). Ce système constitue une évolution coûteuse[3] du KVB vers un système continu et non plus ponctuel qui permet grâce au dialogue continu entre le sol et le bord de pallier les conséquences du caractère ponctuel du KVB sur le débit maximum théorique.

III. La mise en oeuvre – comparaison entre prévision et réalisation:

III.1 Modalités de déploiement:
- 1ere étape sol: carrés de protections des appareils de voie les plus sensibles des principales lignes classiques électrifiées, ainsi que leurs annonces; voies en impasse sur ces lignes les plus fréquentées (5000 signaux fixes et 750 signaux de chantier).
- 1ère étape bord : engins à moteurs électriques (3700 engins).
- Seconde étape sol: extension de la 1ere étape à toutes les lignes électrifiés (11100 signaux fixes et 600 signaux de chantier).
- Seconde étape bord: extension aux engins thermiques fréquentant les lignes électrifiées (1888 engins).

La première étape devait être achevée en 1993 pour la voie et 1995 pour les engins; en fait ces dates ont été respectivement 1995 et 2002; la seconde étape devait être achevée en 1998, elle l'a été en 2006.

III.2 Les coûts:
- Les couts d'investissements ont représenté le tiers des investissements de sécurité de la SNCF entre 1992 et 1996; les investissements prévus (entre parenthèses) et constatés sont les suivants:

En millions d'€ 2005	Première étape: 1990/1995	Seconde étape: 1992/2006	Programme total: 1990/2006	% d'augmentation entre prévision et réalisation
Engins	264 (227)	206 (141)	470 (368)	+28%
Signaux	151(144)	420 (327)	571 (471)	+21%

3 Doublement du cout pour le système sol et augmentation de 50% pour le système bord

Total	415 (371)	626 (468)	1041 (839)	+24%

Les coûts unitaires moyens ont augmenté de 37% pour les engins et de 31% pour les signaux.

- Les coûts de maintenance sont estimés à 2,1 Millions € 2005/an pour les engins et 5,5 Millions €/an pour les signaux.

III.3 Les accidents évités:

le nombre d'accidents évités peut être évalué par:

- Le nombre de dépassements de vitesse: de 2001 à 2003, le KVB a joué son rôle 7300 fois mais on ne dispose d'aucune prévision en situation de référence et d'aucune série statistique.
- Le nombre de franchissements de «carrés fermés» évités, et en sous ensemble, le nombre de franchissements avec engagement du point protégé.

Au moment ou la décision a été prise, les prévisions de franchissements de carré fermés évités (sur la base du nombre d'équipements sol et d'engins réellement équipés) étaient de 38% en première étape et de 78% à l'achèvement du programme.

Cette évaluation était fondée sur une fonction de Cobb Douglas ajustant le nombre de franchissements à éviter aux nombre d'engins et carrés à équiper sur des statistiques de franchissements de carrés entre 1987 et 1989 analysées en détail.

Les franchissements de carrés rouges avaient augmenté en 20 ans en passant de 90 en 1974 à 140 en 1993; on constate qu'à partir de 1994, ils diminuent de façon spectaculaire autour de 65 entre 1994 et 2006 (49 en 2006). Le nombre d'engagements de points protégés passe d'une trentaine à moins de 5 à partir de 2004.

En outre, le test statistique en fonction des séries disponibles et des intervalles de confiance montre qu'en fait il y a eu une diminution de 38% des franchissements de carrés entre les périodes 74/93 et 94/2006 et de 53% quand il s'agit d'engagement du point protégé.

On est donc un peu inférieur à l'objectif d'autant que le trafic sur lignes classiques a diminué (mais pas dans les noeuds et sur les tronçons les plus fréquentés); en revanche aucun accident grave n'a eu lieu depuis Melun en 1991. Si la moyenne annuelle de franchissements de signaux d'arrêts fermés avec engagement du point protégé enregistrée depuis l'année 2004 (inférieure à 5) se confirmait sur une période plus longue, les objectifs initiaux pourraient être considérés comme dépassés.

Cependant le déploiement du KVB n'a pas constitué l'unique élément du plan de sécurité mis en oeuvre par la SNCF; il ne parait pas possible de distinguer la part de ce progrès à attribuer à telle ou telle mesure mise en oeuvre[4].

III.4 Bilan socio économique pour la collectivité:

Le bilan repose sur l'hypothèse du rapport SNCF de 1990 qui table sur 3,4 morts évités chaque année a l'issue du déploiement complet du KVB, fondé sur l'analyse de tous les accidents depuis 1957 jusqu'à 1989[5].

A priori deux approches peuvent être retenues pour évaluer le coût du mort évité pour la collectivité:

-a°) celle qui rapporte le coût actualisé des investissements au taux de 8%, au nombre cumulé de morts économisés sur une période de 20 ans (cela revient à ne pas actualiser le coût du mort évité).

-b°) celle qui permet d'obtenir un taux de rentabilité interne de 8% sur 20 ans.

Dans les deux cas, on peut réduire les couts actualisés d'une valeur résiduelle des équipements installés dans la mesure où la durée de vie des équipements est de 35 ans et que l'investissement s'est étalé entre 1991 et 2006.

Dans le cas a°), le coût implicite du mort évité est le suivant:

4 Les autres mesures étant: le renforcement du plan de formation, l'introduction de la vitesse de sécurité en approche (VISA), le retour d'expérience et l'analyse des incidents.

5 Le nombre annuel de morts évités en cas de suppression de tout franchissement était évalué à 4,35/an; compte tenu d'un taux d'efficacité du KVB de 78% en situation finale, ce nombre est ramené à 3,4/an

A priori	Révision 1998	A posteriori sans valeur résiduelle	A posteriori avec valeur résiduelle
18,5 M €2005	15,6 M €2005	11,5 M €2005	8,1 M €2005

La différence entre la valeur a priori et celles constatées a posteriori résulte du fait que le système KVB est à rendement décroissant: l'étalement dans le temps de la fin du programme allège le poids de l'investissement dans le calcul actualisé alors que les avantages sont déjà en grande partie engrangés.

Dans le cas b°) le coût estimé du mort évité devrait être supérieur à 19 millions d'€ (valeur 2005). Si l'on ramène le taux de rentabilité à 4%, le coût du mort évité est de 13 millions d'€.

Ces valeurs sont à rapprocher des valeurs tutélaires: 0,55 M € 1993 avant 1995 à la suite du rapport « Boiteux I », 1,5 M € depuis 2004 à la suite du rapport « Boiteux II » et 1 M € pour les projets routiers. Le rapport « Boiteux I » préconisait de tester la sensibilité avec une valeur 15 fois supérieure pour les transports collectifs.

III.5 Les autres effets du KVB

RFF reconnaît que le KVB a eu un effet négatif sur la capacité théorique des lignes qu'il évalue à 10% du débit théorique maximum par rapport à une ligne non équipée ou équipée d'un système de contrôle de vitesse continu et non pas ponctuel[6]. RFF chiffre cet effet à environ 30M€/an, ce qui annulerait (selon ce raisonnement) l'avantage en matière de sécurité (environ 4 morts évités par an à un coût pour la collectivité de 8,1 millions d'€).

Toutefois, RFF contrebalance cet effet négatif par les effets positifs tels que:

- les coûts matériels et humains des accidents évités
- les pertes de trafics qui résulteraient des accidents
- et plus généralement l'amélioration de l'image de marque du mode de transport ferroviaire.

IV. L'appréciation globale du projet:

IV.1 Est ce que le KVB a répondu aux attentes en matière d'amélioration de la sécurité?

La réponse est positive: les résultats montrent une diminution sensible des franchissements de signaux et il devrait en être de même pour les dépassements de vitesse; le recul progressif attendu au cours des 10 prochaines années devrait confirmer ce fait. Par ailleurs, ces équipements n'ont pas soulevé d'objections de la part des personnels de conduite de la SNCF du fait de la concertation qui a prévalu pendant toute la phase de mise au point et d'adaptation aux spécificités du réseau français du système suédois initial.

IV.2 Ce progrès est il suffisant au regard des sommes dépensées?

- S'agissant des coûts, un dépassement de 24% doit être apprécié au regard d'un projet technologique de grande ampleur (1 Milliard d'€). S'agissant des délais, on note que la seconde tranche s'est étalée jusqu'en 2006 au lieu de 1998, ce qui peut conduire à s'interroger sur le meilleur degré d'équipement du réseau électrifié. Le Maître d'ouvrage estime que selon l'approche théorique[7], 70% des effets théoriques étaient obtenus dès 1998 alors que 58% des investissements étaient réalisés; en 2002, ces chiffres étaient respectivement de 90% d'efficacité

6 Ce phénomène s'explique par l'impossibilité pour un conducteur qui voit s'ouvrir devant lui un signal annoncé « fermé » par le système KVB d'accélérer avant le passage de ce signal sous peine de prise en charge (freinage d'urgence) par le système qui du fait de son caractère ponctuel n'a pas été informé de la réouverture du signal. Ceci n'est sensible que lorsque la demande à satisfaire se heurte à un phénomène de saturation du réseau.

7 Les accidents évités Y sont une fonction de Cobb Douglas par rapport au taux d'équipement X, telle que: $dY/dX=K/X^a$: pour 100€ supplémentaires investis, le nombre d'accidents supplémentaires évités est de plus en plus faible.

pour 85% des investissements réalisés.

- S'agissant du coût implicite du mort évité pour la collectivité, on constate qu'il est cinq à dix fois supérieur à la valeur tutélaire. On sait que ceci peut être justifié par le cout ressenti par la collectivité dans le cadre d'un accident de masse ou le voyageur n'a pas de prise sur le risque qu'il encoure (contrairement à un voyage en automobile) sans qu'une appréciation chiffrée soit probante (malgré les nombreux travaux sur le sujet)[8].

IV.3 Le projet a t il été lancé dans de bonnes conditions d'études préalables?

Le KVB a été lancé dans un contexte d'accidents répétés ou il fallait que les Pouvoirs publics et la SNCF apportent une réponse; il est probable que ce contexte a accéléré le processus de décision de la première puis de la seconde étape.

La décision s'est appuyée sur un programme d'amélioration de la sécurité qui résultait des études et expérimentations menées depuis 1985, enrichies par les observations et suggestions de commissions d'experts faisant largement appel à des compétences extérieures.

Dés cette époque, s'agissant d'un système destiné à améliorer la sécurité, les principes des Systèmes de Gestion ou de management de la Sécurité (SGS ou SMS) désormais obligatoires au sein de l'Union Européenne (directive 2004/49/CE) ont été mis en oeuvre[9].

Néanmoins, la décision du Conseil d'administration de la SNCF ne s'est pas fondée sur une évaluation socio économique explicite; en particulier, on aurait pu envisager d'autres investissements alternatifs de sécurité permettant de mener une analyse coût avantage (ou de fixer une situation de référence autre que celle au fil de l'eau qui a été implicitement choisie). Ces éléments sont désormais exigés par le décret du 17 juillet 2004.

En revanche, la SNCF s'est livré à une recherche d'optimisation à partir d'un modèle théorique pour « séquencer » les équipements d'engins ou de carrés[10].

IV. 4 La disponibilité ou la fiabilité du système est elle bonne? les effets collatéraux sont ils rédhibitoires ou traitables?

RFF souligne que les objectifs de disponibilité des systèmes bord ont été atteints, ce qui n'est pas la cas des systèmes sol. Des mesures correctives ont été prises prévoyant le remplacement de 14000 balises (sur 120000) sur 3 ans a partir de 2004 à la charge du constructeur (Alstom). Ceci explique en partie le retard de déploiement afin d'éviter de déployer des balises défectueuses.

L'analyse a posteriori des enregistrements du système conduit à constater que la prise en charge (freinage d'urgence déclenché par le système lui-même) par le KVB n'était justifiée que dans 25% des cas de prise en charge; dans les autres cas, il s'agissait d'erreur de paramétrage, d'anomalie du système ou de non respect des règles de réouverture par le conducteur. La SNCF a engagé une réflexion pour réduire ces prises en charge intempestives.

Enfin la réduction de capacité théorique des lignes du fait du concept ponctuel du système semble non négligeable: la perte de débit en heure de pointe à saturation a pu être estimée a environ 10%.

IV. 5 Les retombées industrielles ou en recherche sont elles significatives? qu'en est -il de l'expérience des pays voisins?

Les retombées sont modestes: le chiffre d'affaire généré d'Alstom sur 17 ans serait de l'ordre de 370 millions d'€, et le nombre d'emplois directs de 1000 sur cette période. La maîtrise des logiciels a permis à Alstom d'améliorer son savoir faire, mais l'émergence du système européen ERTMS

---

8 Une étude fournie par RFF indique que le coût du mort ferroviaire évité est trois fois supérieur pour un passage a niveau supprimé présentant un risque 10 fois supérieur à la moyenne des passage à niveau; mais ce calcul n'inclut pas les morts évités sur la voierie.

9 Planification, Réalisation, Vérification (retour d'expérience) et Correction (mesures correctrices, adaptations et évolutions des matériels, programme de remplacement de 14000 balises).

10 Une étude de la SNCF montrait qu'en théorie une fois 3800 signaux carrés rouge et 3600 engins équipés, l'équipement de carrés était plus rentable que l'équipement d'engins jusqu à 6200 signaux équipés: ceci résultait du modèle à rendements décroissants de Cobb Douglas et du cout relatif des équipements.

handicape l'exportation du KVB (non interopérable). Une seule opération a été conduite pour le compte d'Amtrack aux USA.
Les autres réseaux européens se sont équipés sur la même période de systèmes de contrôle de vitesse (une vingtaine!) mais aucun n'est interopérable. A l'exception notable du système allemand, la plupart des dispositifs viennent en redondance ou en complément de la signalisation extérieure, comme le KVB.

V. L'appréciation sur la méthodologie du bilan:

V.1 La mémoire historique et les archives:

Il faut se réjouir que RFF et la SNCF aient anticipé la réalisation du bilan dès 2004 alors que le déploiement n'était pas achevé, ayant considéré que l'essentiel du déploiement était fait en 2000 et qu'il fallait profiter de la présence effective des acteurs ayant encore en mémoire l'opération. En outre, la SNCF a été en mesure de fournir les éléments nécessaires après un important effort de consultation des archives: pour ce type de projet à haute technicité et s'étalant sur une longue période, il faut donc rappeler la nécessité de prévoir un dispositif structuré et continu d'évaluation, dès la mise en oeuvre du projet.
La standardisation des systèmes de sécurité ferroviaires en Europe sur la base des STI (Spécifications techniques d'interopérabilité) et l'obligation d'appliquer les SGS (systèmes de gestion de la sécurité) permettent d'espérer que les nouveaux systèmes disposeront dès leur conception d'un système de collecte des informations.

V.2 L'absence de situation de référence:

A la différence des grands projets d'infrastructure, il n'y a pas de dossier d'enquête publique auquel se référer pour apprécier l'écart éventuel entre les situations ex ante et ex post. Par ailleurs, le KVB n'a ni donné lieu à un bilan socio économique explicite a priori avec avantages et inconvénients, ni à un chiffrage d'un taux de rentabilité interne (ou d'une valeur nette actualisée ex ante). Le bilan s'appuie sur une étude d'efficacité de la SNCF mais il ne permet pas de juger de l'intérêt relatif par rapport a des systèmes alternatifs, à supposer qu'ils existent ou qu'ils soient réellement pertinents.

V.3 La valeur implicite ou tutélaire de la vie humaine:

De nombreuses études de même que l'intuition tendent à montrer que les couts du mort évité dans les secteurs ferroviaires et aériens sont plus élevés que les valeurs pratiquées pour la route et dans des proportions sensiblement supérieures aux errements actuels (facteurs de 1 à 10 au lieu de 1,5).
Il serait judicieux de disposer d'un corpus de référence partant des concepts théoriques tels que ceux développés par Allais: sensibilité des acteurs 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, qui est nettement plus élevée pour les transports collectifs qui pour les transports individuels.

V.4 Les limites de l'approche coûts avantages:

Ce n'est pas parce qu'on ne dispose pas aujourd'hui des outils méthodologiques pour évaluer l'ordre de grandeur des pertes ou gains lies aux accidents qu'il ne faut pas y consacrer des travaux d'approfondissement voire de recherche, en particulier sur les 3 points suivants:

- Réduction théorique de capacité des réseaux liés aux systèmes de sécurité, à niveau de sécurité Globalement Au Moins Equivalent (GAME),
- Perte de trafics a l'issue d'accidents graves dans les différents modes de transports
- Dévaluation de la valeur d'une marque à la suite d'un grave incident médiatisé.

VI Conclusions Générales:

VI.1 S'agissant de l'investissement lui-même:

- Il semble que celui ci ait répondu aux attentes en terme d'amélioration de la sécurité.
- Son cout de réalisation a été supérieur de 24% au coût prévisionnel, ce qui ne semble pas déraisonnable eu égard à la nature du projet.
- Les délais de réalisation de la seconde tranche ont été sensiblement dépassés; la question de la pertinence de poursuivre la réalisation de la totalité du programme reste posée bien que la décision d'interrompre un programme de cette nature soit difficile à assumer.
- L'investissement correspond à un coût implicite du mort évité élevé par rapport aux valeurs tutélaires actuelles; mais il n'apparaît pas possible de dire quels investissements alternatifs il aurait fallu décider en réponse aux graves accidents des années 80/90.
- Enfin, il est probable que cet investissement a eu un effet négatif sur la capacité des lignes, en cas de saturation.

VI.2 S'agissant des etudes ex ante préalables au bilan:

- On recommande, pour les grands investissements technologiques (tels que le système de radio communications numérique GSM-R destiné a remplacer à l'horizon 2014 la radio sol train ou le futur ERTMS), qu'un véritable dispositif d'évaluation socio économique soit mis en oeuvre des le démarrage des projets. Il faut que les décisions soient prises, comme pour les grands projets d'infrastructures conformément à l'instruction de 2004, sur la base d'évaluations socio économiques explicites, ce qui n'empêche pas in fine des choix politiques.
- Les nouveaux textes (décret du 19 octobre 2006) relatifs à la sécurité des circulations ferroviaires et à l'interopérabilité du système ferroviaire ayant transposé la directive 2004-49/CE, fixent désormais le processus de gestion de la conception et de la réalisation des systèmes de transport public ferroviaire et de délivrance des agréments, certificats et attestations de sécurité. Ceci fournit désormais un cadre cohérent aux études.

VI.3 S'agissant des méthodes d'évaluation:

Les Pouvoirs publics doivent soutenir des recherches permettant de mieux évaluer:

- La sensibilité du public aux accidents sur la base des travaux théoriques permettant de mieux approcher la valeur tutélaire du mort évité pour la collectivité.
- Les pertes de trafics consécutifs aux accidents dans les transports collectifs ou les pertes de valeur d'une marque dans le domaine ferroviaire à la suite d'une catastrophe.
- Les effets collatéraux de tels investissements telle que la perte d'efficacité, par exemple la réduction de capacités des réseaux pour le KVB[11]. En particulier, un bilan du nouveau comportement des machinistes à la suite de la généralisation du KVB pourrait être mené.

---

11 Il conviendrait de promouvoir le développement de méthodes d'évaluation des mesures ou systèmes complémentaires ou alternatifs (par exemple passage à un système continu, investissement infrastructure, refonte des graphiques) permettant de contourner, dés lors qu'elles deviennent des contraintes, les limites de capacité du réseau conséquences de l'installation de systèmes tels que le KVB dont la finalité est d'améliorer la sécurité.