

Voie ballastée à 400 km/h

Dr.-Ing. Marc ANTONI

Ing.CNAM - Ing ESE - FIRSE

Marc.antoni@sncf.fr

Le Problème

Les coûts de maintenance (entretien et renouvellement) de la voie et des appareils de voie dépassent 2/3 des coûts de maintien en condition opérationnelle d'une infrastructure ferroviaire.

Les lignes à grande vitesse, introduites par le Japon et la France, constituent importante une voie de croissance pour le trafic ferroviaire.

⇒ Une question se pose aux gestionnaires d'infrastructure et fait l'objet de notre exposé :

- Faut-il céder à la mode de la voie sur dalle quelle que soit la vitesse ?
- Est-il nécessaire d'y succomber pour rouler à 400km/h ?
- Est ce toujours la solution la plus efficiente techniquement et économiquement ?
- Quel est l'impact du matériel roulant sur ce choix ?

D'une manière générale, qu'est-il nécessaire de considérer pour construire un choix objectif :

- Quels sont les domaines de pertinence des différentes solutions techniques existantes ?
- Quelle sont les corrélations avec les différents types de matériels roulants ?
- Quels sont les principaux facteurs à prendre en compte pour objectiver le choix de la nature de la superstructure (vitesse, sinuosité du tracé, topologie du réseau...)

⇒ **Il s'agit de tenir compte des impacts de ce choix sur toute la durée de vie de l'infrastructure (LCC) et pour des caractéristiques données du matériel roulant aujourd'hui à V300, demain à V400, pour faire évoluer la pensée commune...**

Une vision système

La voie ferrée n'est pas isolée, même si elle tient une place centrale dans l'infrastructure ferroviaire :

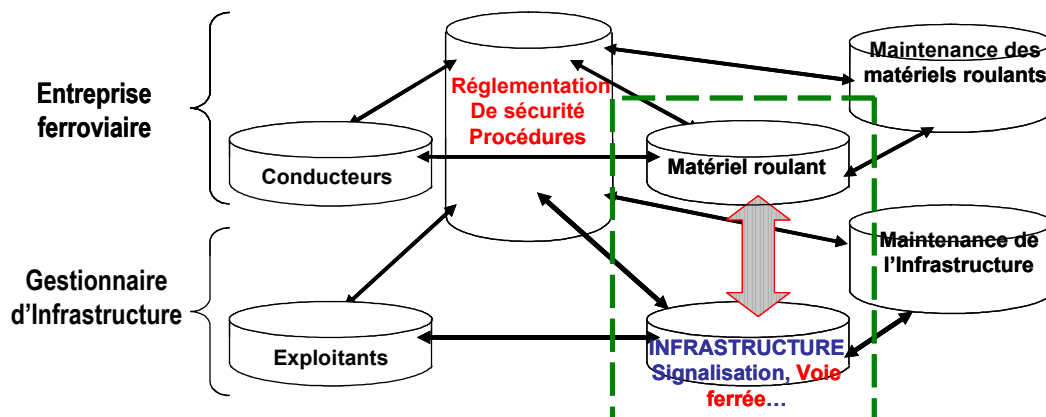


Figure 1 : Schématisation globale du système ferroviaire

Naturellement :

- Un nouveau matériel roulant peut impacter la disponibilité et la sécurité de la signalisation ;
- Le changement de technologie de la voie peut impacter la disponibilité et la sécurité de la signalisation (ex: voie avec et sans ballast...)...

La voie ferrée doit être considérée dans le système ferroviaire global, dans ses aspects interaction avec les matériels roulants, maintenance, économie, sécurité :

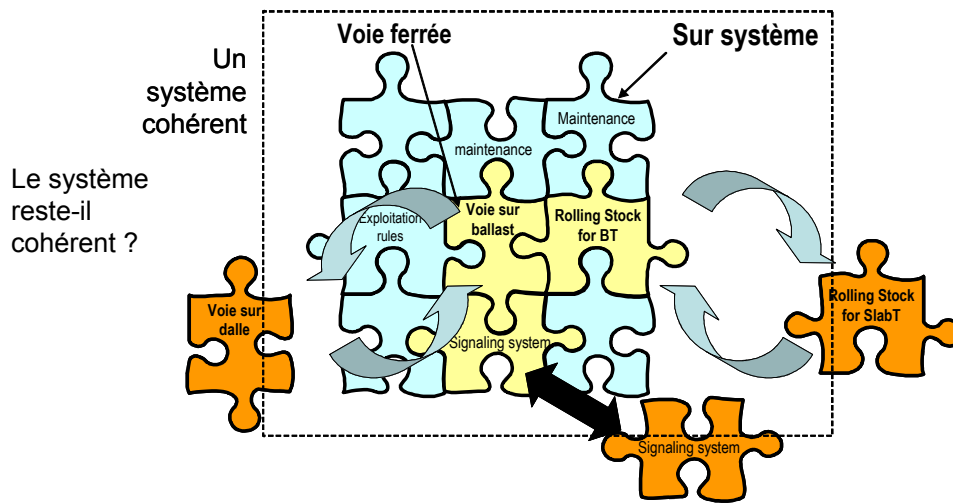


Figure 2: Schématisation des évolutions dans le système ferroviaire global

Quand ces trois nouveaux morceaux de puzzle sont insérés en remplacement des anciens, le système global reste-il cohérent, tant en matière de coûts que de sécurité ?

C'est sur des bases objectives qu'il faut comparer les systèmes cohérents: le LCC (Life Cycle Cost) est pour la voie fonction du tracé et de la vitesse cible !

Le cycle des Ingénieries système et de maintenance pour obtenir un système cohérent et efficient, économiquement, techniquement et sur le plan de la sécurité système :

:

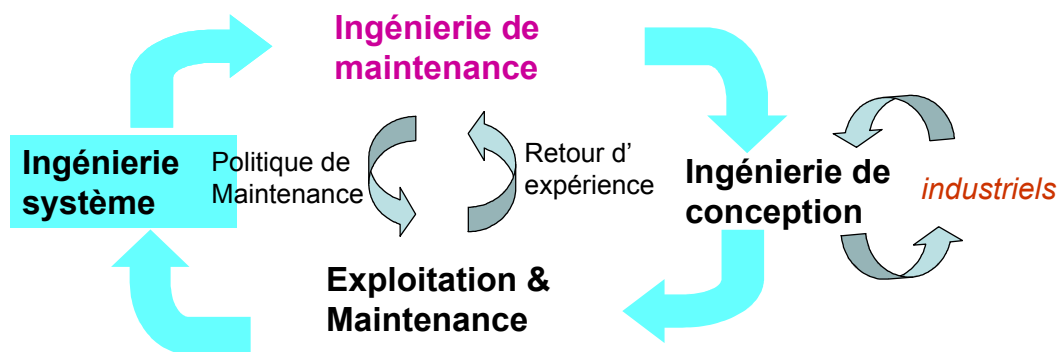


Figure 3: cycle de recommandé d'ingénieries système, de maintenance et de conception permettant de conserver la cohérence du système ferroviaire

- **Ingénierie Système** : Performances attendues pour que le système **sol et bord** soit économiquement efficient : vitesse, type de matériels roulant, tracé, coûts d'investissement et d'entretien... V400 par exemple
- **Ingénierie de maintenance** (très souvent oubliée): Quelles prescriptions **sol et bord** pour garantir la tenue de ces performance sur la durée de vie du système? Quelle stratégie de maintenance (pour tenir le V400 par exemple) ? En sortie de ces travaux, des analyses LCC et RAMS son menées pour valider les spécifications de maintenabilité et de testabilité, les spécifications d'entrée en périmètre de maintenance. Seulement à ce stade peut être lancé l'appel d'offre pour une maîtrise d'œuvre générale (MOEG)

- **Ingénierie de conception (ou MOEG):** Comment faire réaliser et homologuer les produits, sous-systèmes et systèmes nécessaires / y c. l'intégration technique du système. Les industriels sont en charge des fournitures et des développements, la MOEG assure l'intégration technique du système.
- **Politique de maintenance et Retour d'expérience:** Référentiels de maintenance pour un ensemble bord et sol donné – Adaptation de celui-ci en fonction du retour d'expérience (lois de dégradation, de défaillance...)

Puis l'ingénierie système doit Retour d'expérience système pour la génération suivante (continuité).

Les périmètres de responsabilité sont alors clairs :

- Ingénieries systèmes et de maintenance ainsi que l'exploitation et la réalisation de la maintenance (le cas échéant avec sous-traitance) sont de la responsabilité du gestionnaire d'infrastructure ou des matériels roulants ;
- Ingénierie de conception (le cas échéant avec couverture des risques cachés) est de la responsabilité de la MOEG.

Au contraire, Le cycle à éviter, même s'il est pratiqué actuellement, pour obtenir un système cohérent et efficient sur la durée de vie :

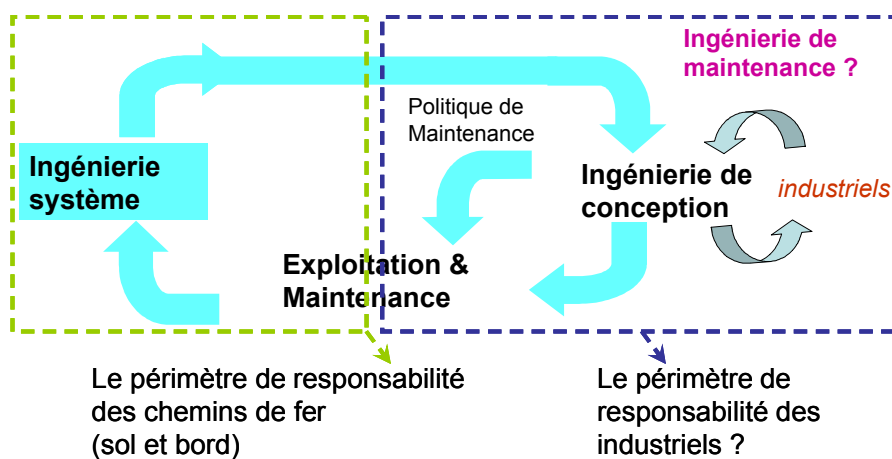


Figure 4: Cycle actuel des ingénieries système et de conception

- Pas d'ingénierie de maintenance ou alors un ersatz dont les travaux sont orientés pour la rentabilité des prestations des industriels, à court ou à moyen terme ;
- L'ingénierie système est dans le périmètre de responsabilité des gestionnaires d'infrastructure (Bord et sol);
- L'ingénierie de conception (MOEG notamment) et la définition des politiques de maintenance (entretien et renouvellements) sont du ressort des industriels.

Une question majeure : quid de la cohérence de l'ensemble ? Quid de l'intégration de ce système (pièce du puzzle) dans l'ensemble de système ferroviaire national ? Qui enfin est responsable in fine ?

La définition d'une ligne à V400 repose sur un processus tel que décrit précédemment :

1. **Ingénierie système** : définition des performances du système, du contexte d'exploitation, des matériels roulants mis en œuvre, des objectifs économiques sur le cycle de vie... en lien avec l'Ingénierie de conception pour l'état de l'art, l'état des marchés, etc.

2. **Ingénierie de maintenance**, avec ses deux aspects:
 - les exigences sur les matériels roulants et sur l'infrastructure pour atteindre sur la durée les objectifs de performance, pour que le système soit viable
 - la définition des référentiels de maintenance (entretien et renouvellements), retour d'expérience...
3. **La continuité** des gestionnaires d'infrastructure et de matériels roulant pour garantir la cohérence du système et tenir compte des enseignements passés
4. **La nécessité** de tenir compte différentes philosophies nationales pour l'exploitation, les matériels roulants, l'infrastructure afin de ne pas détruire la cohérence des systèmes nationaux !

Il n'y a pas de solution unique pour atteindre un objectif, par exemple le V400
Il ne faut éviter de partir du produit final pour ne pas impacter le système ferroviaire dans sa cohérence

Voie ballastée – Durée de vie des composants

La voie ballastée a essentiellement trois composants : le rail, les traverses et le ballast

Leur durée de vie dépend fortement des conditions d'usage et d'environnement :

- notamment le matériel roulant, la vitesse, les conditions de tracé, la nature du sous sol
- les lois de dégradation et de défaillance ne sont valables que pour un contexte d'usage et d'environnement fixé.

La voie ballastée pour ligne à grande vitesse conçue par M.Prudhomme (1976) permet d'obtenir à 270km/h : **un coût d'entretien équivalent à celui d'une ligne conventionnelle SI le matériel roulant est adapté**, c'est à dire avec :

- une charge à l'essieu maximale de 17 tonnes
- une masse non suspendue minimale (cf. Livre de M. Alias)
- un entraxe de boggie de 3m
- une distance inter boggies de plus de 5 fois l'entraxe
- un carénage sous caisse (pas d'effet Venturi)

La vitesse limite de cette voie est de 320 km/h pour ne pas entrer dans le domaine de viscosité du ballast (~30Hz) et ainsi accroître les coûts de maintenance de la voie

- A noter que pour les matériels conventionnels (boggies avec entraxe classique) cette limite est de 250 km/h
- Ceci explique les surcoûts de maintenance pour les lignes à voie ballastée et à trafic mixte (+15 à 20% sur LN6) [Paris - Baudricourt]

La vitesse a un impact notable sur l'énergie transmise à la voie aux fréquences supérieures à 30 Hz : Impact sur la tenue de la géométrie des LGV

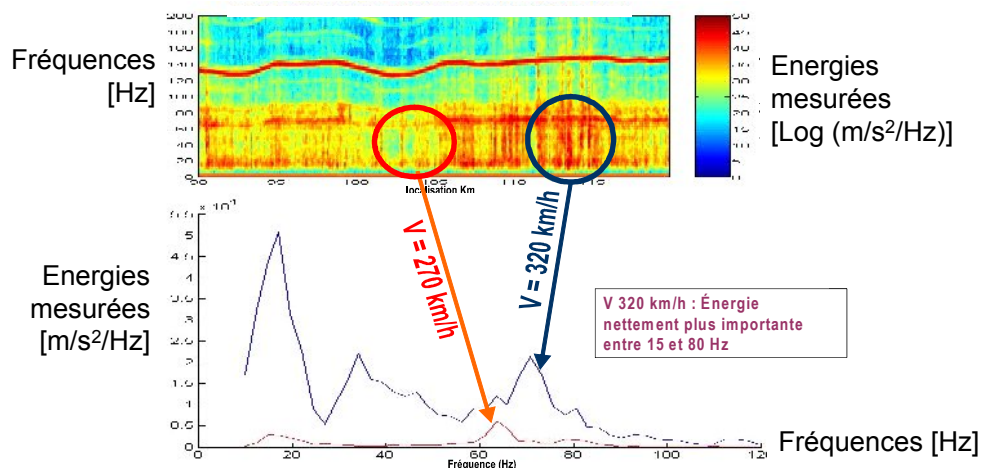


Figure 5: Spectres de l'énergie mesurée au passage de circulations à grande vitesse

Les mesures ont été réalisées avec un entraxe de 3 mètres. Elles auraient été encore plus contraignantes avec un entraxe de 2,5m. En effet, avec une vitesse de 320km/h et un entraxe de 2,5m, il vient une fréquence de sollicitation verticale de 35,6Hz (les bourreuses travaillent généralement à 35 Hz) ce qui est déjà en bordure du domaine de viscosité du ballast. Naturellement cette fluidification du ballast induit une dégradation plus rapide de la géométrie au passage des circulations.

Cette vitesse limite peut être repoussée par la mise en œuvre de **mesures complémentaires : la voie ballastée moderne**. Il s'agit de réduire la puissance transmise au-delà de 30Hz) et ainsi de réduire les coûts de maintenance de la voie. Il s'agit notamment :

- des couches de forme en grave-bitume
- des PAD (chaussons sous traverses)
- des traverses cadre avec profil de ballast abaissé
- une maintenance « en bloc » adaptée

La nature de la sous-couche a une influence notable sur la durée de vie de la voie et la maîtrise de la géométrie des lignes à grande vitesse :

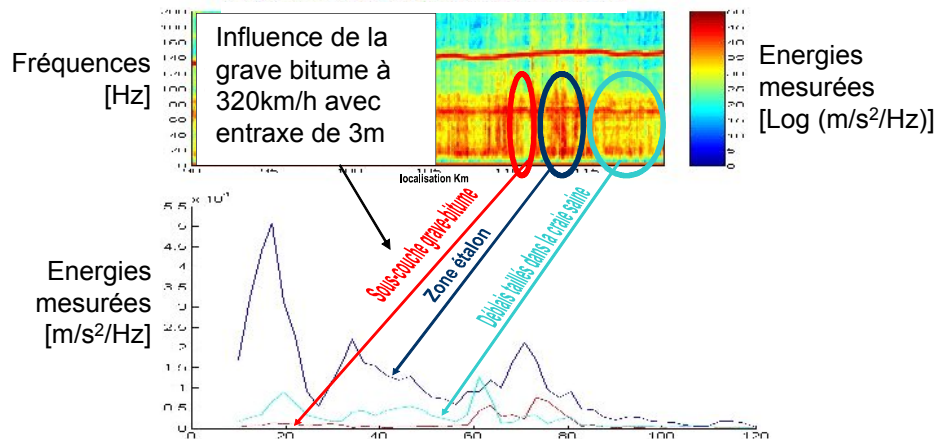


Figure 6: Spectres de l'énergie mesurée au passage de circulations à grande vitesse

Le tronçon test avec Grave Bitume permet d'obtenir une réduction d'un facteur 2 du pourcentage de longueur bourrée annuellement.

Les PAD (chaussons sous traverse) ont une influence notable sur la durée de vie de la voie et la maîtrise de la géométrie des lignes à grande vitesse :

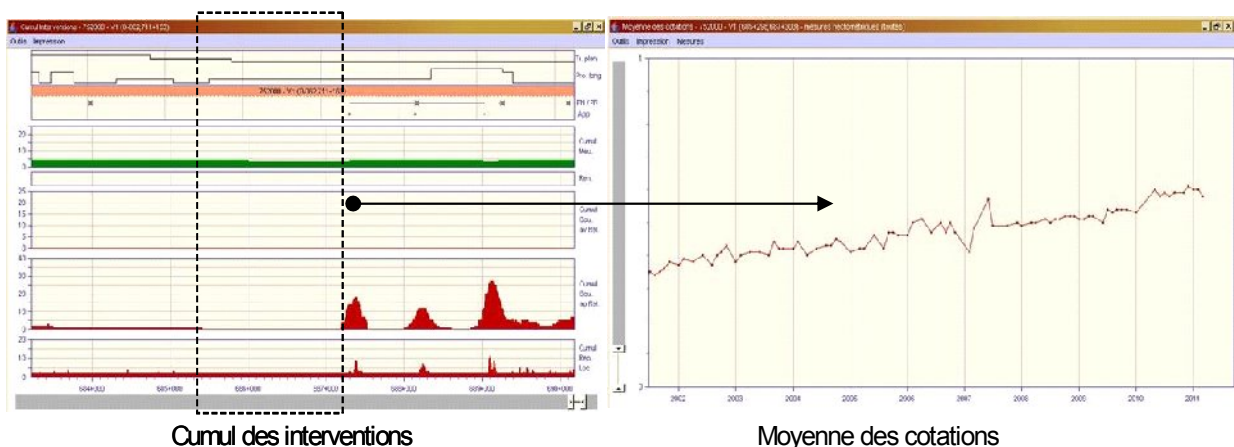


Figure 7: Cumul des interventions de maintenance et évolution du NL sur 10 années

L'analyse des lois de défaillance des rails (UIC60 – 260) (défaut S, X1, X2) montre que :

- la durée de vie des rails sur LGV ballastée est de l'ordre de 30 à 35 ans (~700 MT), même en l'absence de meulage préventif
- la durée de vie des soudures aluminothermiques est compatible avec celle des rails
- les paramètres de ces lois sont peu sensibles aux conditions de tracé mais très sensibles à l'agressivité du matériel roulant

Remarque : Le taux de défaillance peut croître plus rapidement si le matériel roulant a un taux de « glissement » important (20% pour certains matériels !)

L'analyse des lois de défaillance des cœurs et demi-aiguillages des appareils de voie montre que :

- la durée de vie de ces constituants est plus longue sur plancher bois que sur plancher béton (~400MT) ce qui ne préjuge pas du résultat LCC
- la durée de vie des soudures aluminothermiques est compatible
- les paramètres de ces lois sont sensibles à l'agressivité du matériel roulant

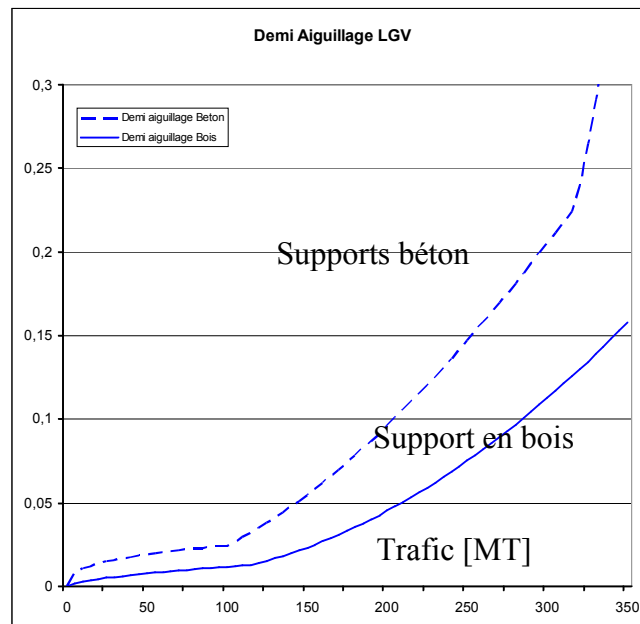


Figure 8: fonctions de répartition des lois de défaillance des ½ aiguillages

Le taux de défaillance peut croître plus rapidement si le matériel roulant a un taux de « glissement » important (20% pour certains matériels !)

L'analyse des lois de défaillance des traverses montre que :

- la durée de vie des traverses en béton sur LGV ballastée est de l'ordre de 55 à 60 ans, même en l'absence de consolidation
- la qualité des attaches joue un rôle déterminant dans cette durée de vie
- les paramètres des lois sont peu sensibles aux conditions de tracé mais très sensibles à l'agressivité du matériel roulant

Remarque : Les projections de ballast des rames mal carénées peuvent détruire les attaches

L'analyse des lois de dégradation de la géométrie montre que :

- la durée de vie du ballast, sans grave bitume ni PAD, est de l'ordre de 25 à 30 ans sur LGV (>300)

- celle-ci sera supérieure avec grave bitume et PAD
- le besoin de maintenance suit des lois de Cochet-Maumy

$$Im(N) = k \times 0,8 \times \delta \times \left(a + b \times \left(2^{\frac{N}{5}} - 1 \right) \right)$$

Remarque : Les paramètres de ces lois dépendent du type de **matériel roulant** et des conditions de tracé

Voie sur dalle – Durée de vie des composants

La voie sur dalle a essentiellement trois composants : le rail, les supports et la dalle

Leur durée de vie dépend fortement des conditions de sollicitation et d'environnement :

- notamment les conditions de tracé, la nature du sous sol
- les lois de dégradation et de défaillance du rail ne sont valables que pour un contexte d'usage et de tracé fixé
- la nature du sous sol, la constitution des remblais, la qualité du drainage et des bétons influent sensiblement sur le besoin de maintenance



Figure 9: Voie sur dalle en Corée (Rehda 2000)

La voie sur dalle pour ligne à grande vitesse veut réduire les coûts d'entretien de la géométrie :

- avec une augmentation des coûts liés aux rails, aux appareils de voie et une réduction de leur durée de vie ;
- avec a priori moins de contraintes sur le **matériel roulant**, même si les critères requis par la voie ballastée ne peuvent être que favorables pour sa durée de vie.

La vitesse limite de cette voie est annoncée à 400 km/h (même si une réduction de 350 à 300km/h a été sur des réseaux, tant pour les coûts de maintenance du matériel roulant que de la voie (fissurations...) :

- A noter que pour les matériels conventionnels, les masses non suspendues agressent la voie (rails et dalle)
- La pose sur dalle permet des conditions de tracés plus complexes (RP et RC...) que la voie ballastée

L'analyse des lois de défaillance des rails (défauts S, X1, X2) montre que :

- la durée de vie des rails sur voie sur dalle est jusque 30% plus faible que sur voie ballastée dans les courbes de R<5000m \Rightarrow Rails 350HT ou 370LHT dans les courbes
- la durée de vie des soudures aluminothermiques n'est plus compatible avec celle des rails \Rightarrow soudures électriques obligatoires avec les Rails 350HT

L'absence de circuits de voie impose meulage et/ou fraisage et réduit la durée de vie ! (par exemple 11mm d'usure verticale du rail sur LGV de 9 ans, pour une valeur maximale de 15 mm pour un profil UIC60).

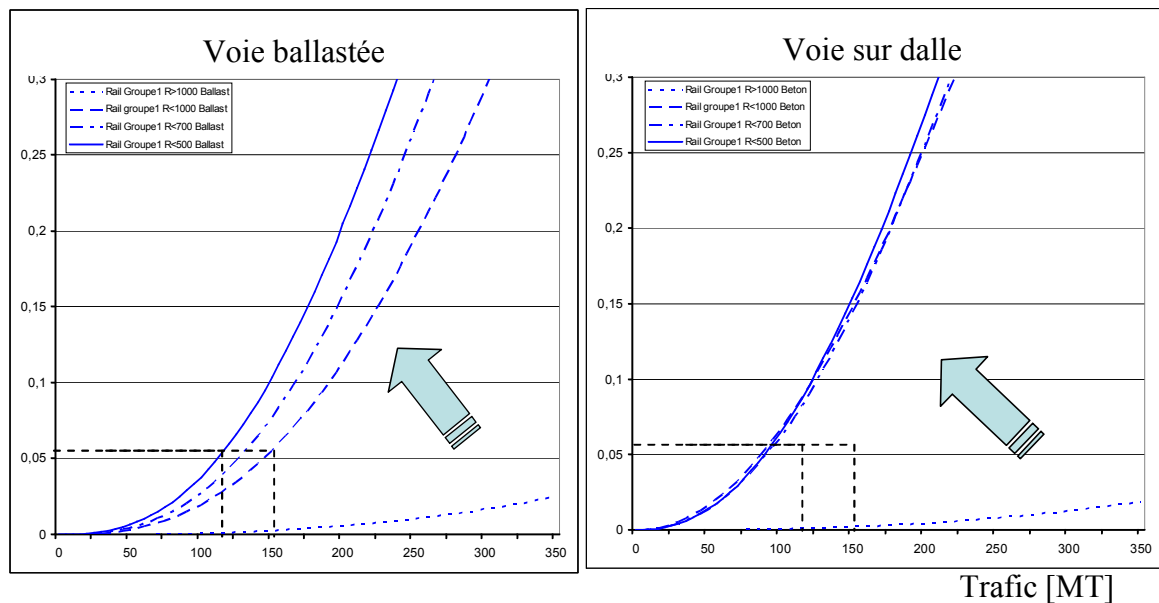


Figure 10: fonctions de répartition des lois de défaillance des rails sur voie ballastée et sur dalle pour différents rayons de courbure (sur une même ligne UIC Groupe 1)

Par analogie avec des lois de défaillance des rails, pour les cœurs et ½ aiguillage il vient que :

- la durée de vie des pointes de cœur et des demi-aiguillages est plus faible sur voie sur dalle que sur voie ballastée ;
- les paramètres des lois sont sensibles aux conditions de tracé.

Une durée de vie des appareils de voie de 15 ans (< 300MT) est à considérer

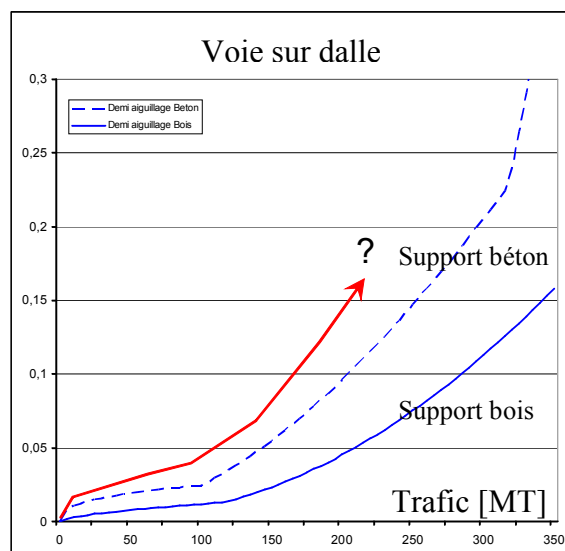


Figure 11: Estimation de la fonction de répartition des lois de défaillance des ½ aiguillages posés sur voie sur dalle

L'analyse des lois de dégradation de la géométrie montre que :

- la dégradation de la géométrie est lente lorsque le sous-sol est stable

- les reprises de géométries sont couteuses pour réglage par les supports, encore davantage si une injection de béton sous pression est requise)
- les conséquences suites à déraillement ou mouvement de terrain sont importantes (Chine en novembre 2009, Taiwan en mars 2010)

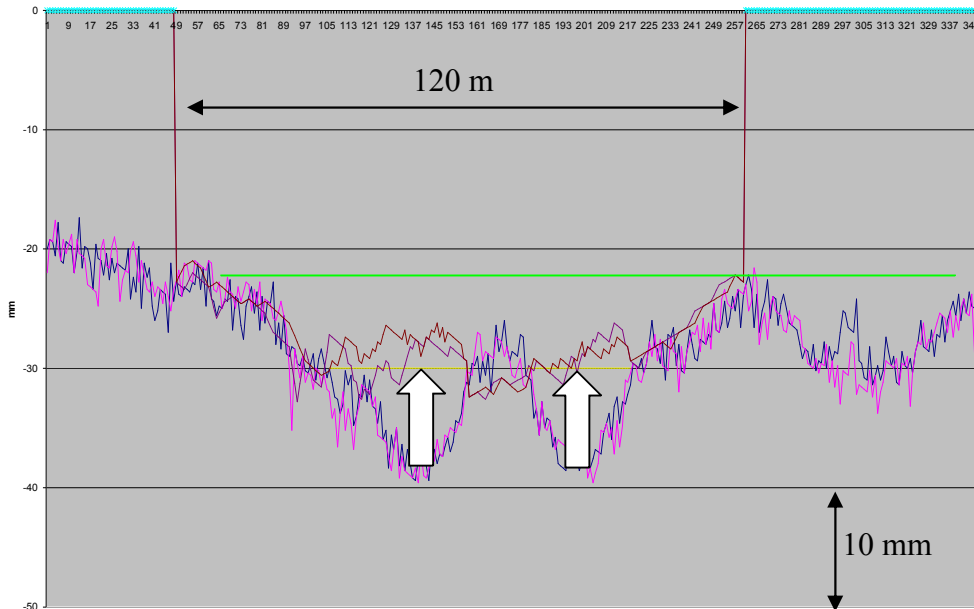


Figure 12: Relevé laser du nivellement longitudinal sur une voie sur dalle (ligne Paris – Baudrecourt)

Pour atteindre la cible « jaune », les corrections ont effectuées sur les supports afin de lever le ralentissement de vitesse (en brun les mesures après travail).

Pour atteindre la cible „verte“, les corrections sont à effectuer par injection de béton sous pression et à prise rapide afin de remettre la voie dans sa situation nominale. Une interception de la voie de plus de 10 heures serait requise.

L'analyse de l'impact sur les paramètres de transmission montre que la pose sur dalle :

- augmente la résistance linéique de la voie (pour le circuit de voie et le retour traction)
- réduit l'inductance linéique de la voie

Ces deux effets peuvent perturber les circuits de voie et le retour traction (saturation du rail)

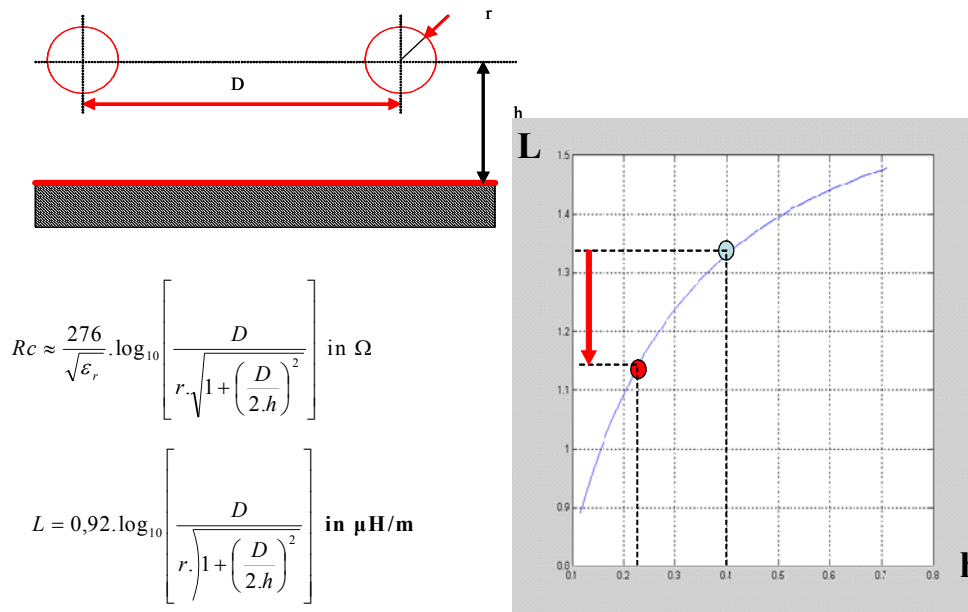


Figure 13: effet de la voie sur dalle (Rheda) sur les paramètres de transmission

Réduire la portée des circuits de voie renchérit le coût d'équipement de la ligne. Les supprimer impose une politique de maintenance des rails plus onéreuse sur l'ensemble de sa durée de vie.

Que faut-il retenir ?

La voie sur dalle a des avantages certains en matière de tracé et d'absence de bourrage, régéage, ballastage... mais il faut tenir compte que :

- Voie sur dalle (sans précautions particulières)
 - => pas de circuits de voie (coûts ↓)
 - => pas de détection du rail cassé (risque↑)
 - => soudures électriques en voie (coûts↑)
 - => politique de meulage ou fraisage importante (coûts ↑)
 - => durée de vie du rail et AdV de <15 ans (coûts ↑)
- Voie sur dalle en courbe
 - => rail 350HT ou 370LHT (coûts ↑)
 - => soudures électriques (coûts ↑)
 - => meulage annuel spécifique en courbe (coûts ↑)
 - => durée de vie du rail de <15 ans (coûts ↑)

Ces effets peuvent être réduits si le tracé est rectiligne et si les matériels roulant ont peu de glissement. Afin de réduire ces effets et permettre le fonctionnement des circuits de voie, une voie sur dalle SNCF est en cours d'étude.

LCC - application à la voie ferrée

Particularité essentielle de l'équipement ferroviaire: le coût de régénération et les coûts d'entretien sont fortement liés à:

- la capacité disponible du réseau ;
- la nature des matériels roulants.

L'approche du coût total de possession (LCC) doit intégrer :

- la valeur de la ressource capacité mobilisée pour régénérer et entretenir l'installation, alors que le coût des opérations de régénération et d'entretien dépend en proportion inverse de la capacité rendue disponible pour les réaliser ;
- la nature des sollicitations particulières des matériels roulants et leur impact sur le besoin de maintenance de l'infrastructure.

Les coûts d'exploitation sont corrélés à l'âge et l'état de l'infrastructure :

- le mauvais état de l'infrastructure ou son âge élevé se traduit par des dysfonctionnements qui pénaliseront ou rendront impossible son utilisation avant une intervention d'entretien correctif ;
- dans le système actuel et, en l'absence de pénalités liées à la déficience du réseau, cela ne se traduit pas par des coûts d'exploitation supérieurs.

Une limite néanmoins : une infrastructure qui présente des défauts ou un état vieillissant va nécessiter un surcroît de capacité pour l'entretien ou son renouvellement, ce qui va réduire sa disponibilité et donc sa valeur commerciale.

Si l'équipement doit être renouvelé alors qu'il n'est pas en fin de vie, il faudrait retrancher du coût global la valeur résiduelle, qui traduit la valeur économique de l'équipement ou d'une partie de l'équipement pouvant encore être utilisé.

Le coût global de possession peut s'écrire :

Coût global de possession =

Coût de régénération (fonction de la capacité et de la technologie)

- + Coût d'entretien : surveillance, maintenance préventive et corrective
(fonction de la capacité, de la technologie, de la nature des matériels roulants)
- + Valeur de la capacité consommée
- Valeur résiduelle

Dans la pratique : les constituants n'ont pas été régénérés à la même date ; il y a un décalage entre les durées de vie théoriques et les durées de vie observées sur les équipements réels. L'ensemble des constituants est alors renouvelé alors qu'ils ne sont pas en fin de vie, ce qui nécessite d'intégrer les valeurs résiduelles. Il est judicieux de chercher à prendre des mesures techniques pour favoriser la convergence de fin de durée de vie des différents constituants.

⇒ **Date de remplacement de l'ensemble selon un critère technique et économique. Ceci est à prévoir en ingénierie de maintenance en fonction du tracé et de la nature des matériels roulants.**

La valeur du loyer de l'argent devrait rentrer en ligne de compte en intégrant la notion d'actualisation (quel sens au niveau d'un réseau ?).

- Tous les coûts, ainsi que les valeurs résiduelles utilisées, dépendent de l'actualisation au taux i .
- Pour les valeurs résiduelles, la formule communément utilisée définit la valeur V_n , la n ème année du bilan pour un bien dont la durée de vie est de m années, en fonction de la valeur V_0 au début du bilan (année 0) selon :

$$V_n = V_0 [(1+i)^m - (1+i)^n] / [(1+i)^m - 1]$$

Ainsi, la détermination du coût global de possession d'une voie ferrée est un exercice complexe du fait de la multiplicité des composants et de leur durée de vie importante et variable en fonction de paramètres exogènes.

Les coûts d'entretien varient selon l'utilisation de l'infrastructure : plus celle-ci est densément utilisée ou utilisée par du matériel plus agressif au regard de sa technologie, plus il est nécessaire d'intervenir.

C'est pourquoi cette analyse oblige à raisonner en dépassant la technologie de la voie et en segmentant le réseau en fonction de la nature des matériels roulants notamment et de sa topologie (possibilité ou non d'interrompre le trafic sur une longue durée).

LCC – Comparaison Voie ballastée et voie sur dalle

Un gestionnaire d'infrastructure doit pouvoir évaluer comparativement dans son contexte **voie sur dalle et voie ballastée**. Il est classiquement entendu que :

Durée de vie	~ 50 ans	~ 60 ans
Technologie	UIC60, B70	Bögl, Rheda...
Maintenance	Meulage, Bourrage, RB et RR	Meulage, Drainage, Corrections de la géométrie, RR...
Invest. «Voie» à neuf (renouvt x2)	0,5 M€/km	1 à 2 M€/km (sans prise en compte de l'interruption de circulation)
Invest. «SE»	CdV et RC	CE sans RC
Vitesse	250 si $d=2,5m$ 320 si $d=3,0m$	300 (350 ?)

Approche LCC pour une approche **voie ballastée** V300 dans un contexte adapté :

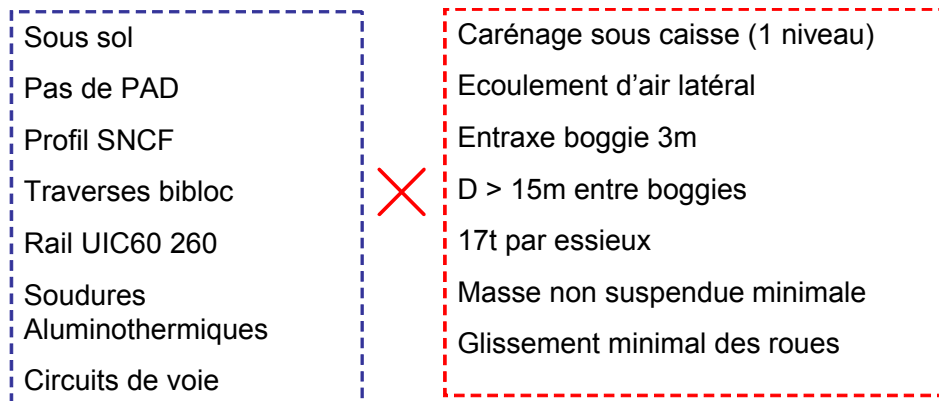


Figure 14: Concept de voie ballastée à V300 en France

La voie ballastée. Le taux de défaillance et la durée de vie des composants peuvent-être estimés en fonction des conditions d'usage :

- Pour les traverses : loi de Weibull (selon existence de semelles sous traverses) [$\beta > 10$, $\eta \sim 55$ à 60ans]
- Pour les rails : double loi de Weibull (défauts de contact et défauts internes) [$\beta \sim 1,45$ et 3] / RR chaque 30 ans. Si néanmoins les matériels roulants ne sont pas trop agressifs !
- Pour la géométrie : loi de Cochet-Maumy (selon la nature des circulations, leur vitesse et l'existence de meulage...) – RB ~ 27 à 30 ans pour LGV

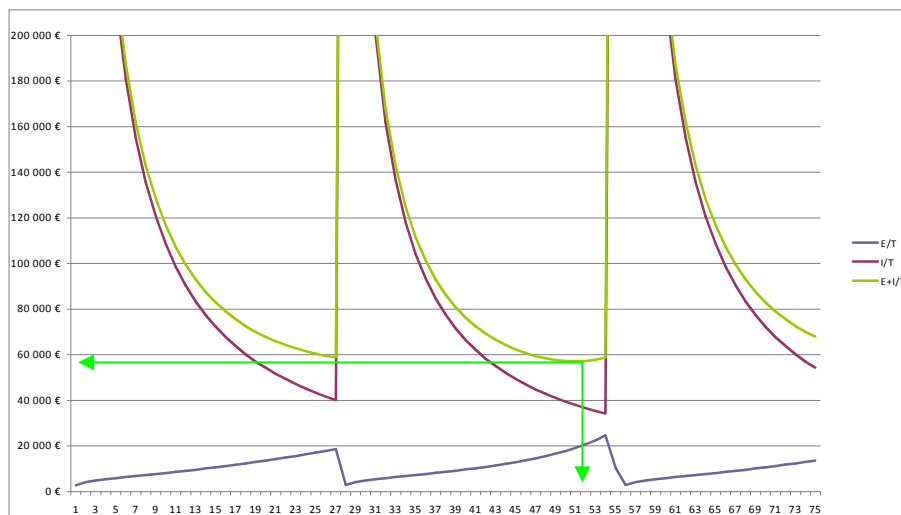


Figure 15: Analyse LCC – Concept de voie ballastée à V300 en France

Approche LCC pour une approche **voie sur dalle** V300 dans un contexte adapté

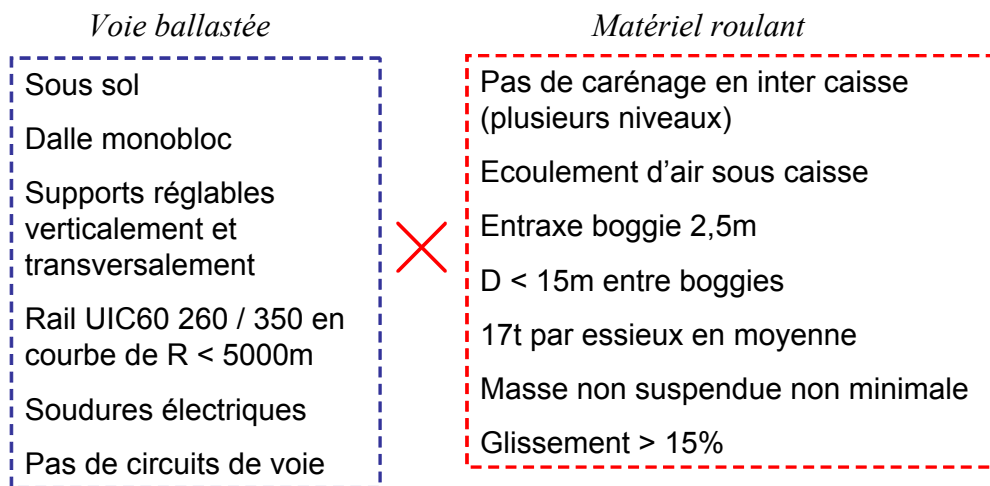


Figure 16: Concept de voie sur dalle à 300 à l'étranger

La voie sur dalle : Le taux de défaillance et la durée de vie des composants pourraient-être de même estimés en fonction des conditions d'usage. En première approche :

- Pour les supports ou attache : Weibull [$\eta_{VD} \sim 2 \cdot \eta_{VB}$]
- Pour les rails : double loi de Weibull (défauts de contact et défauts internes) avec des lois différentes selon la pose en courbe ou en alignement [$\eta_{VD} \sim 2/3 \cdot \eta_{VB}$]
- Pour la géométrie : fréquence des interventions est variable selon la nature du sous sol, l'état du drainage [$I_{mVD} \sim I_{mVB} / 4$]

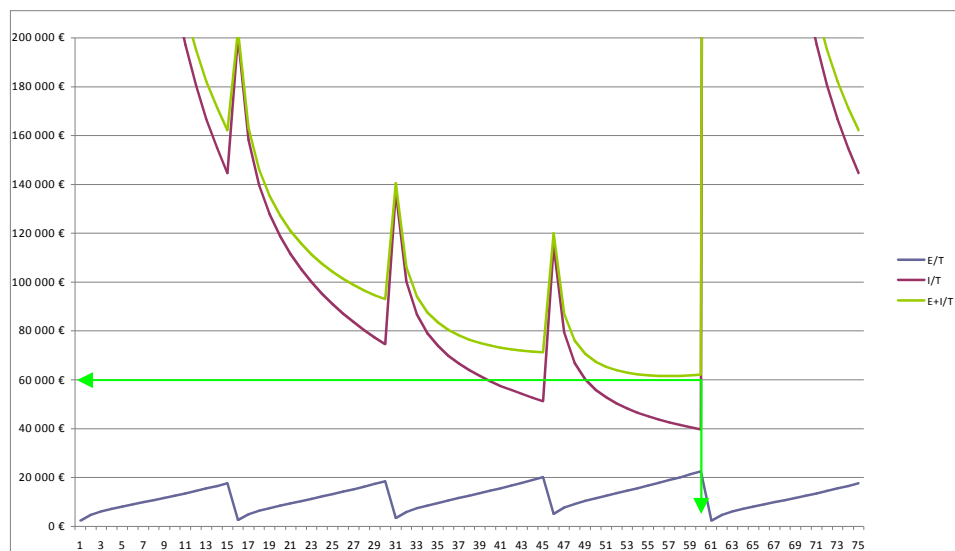


Figure 17: Analyse LCC – Concept voie sur dalle à V300 à l'étranger (estimation)

La voie sur dalle

Et certains effets connexes n'ont pas été valorisés :

- Le ferrailage de la dalle réduit le niveau de performance des circuits de voie (portée divisée par 2 ou plus...). Le recours aux compteurs d'essieux conduit à abandonner la détection du rail cassé : admission d'une probabilité de rupture grave, quel prix du mort à prendre en compte ?

- Les délais de renouvellement et de reprises de la géométrie sont importants, voire rédhibitoires selon la topologie du réseau (absence de chemin de détournement...)
 - Les délais de remise en état suite à déraillement peuvent être importants (voie monobloc notamment).
- ⇒ Surcoûts à valoriser et intégrer dans le vrai bilan LCC

Que faut-il en retenir ?

Les calculs précédents ont été faits sans prendre en compte :

- les appareils de voie (et l'on sait leur impact sur les coûts de maintenance d'une ligne) ;
- les coûts d'interception (sic) ;
- les limites d'interceptions possibles (réseau maillé ou non) ;
- les effets connexes précédents.

Les calculs précédents montrent que les deux solutions sont économiquement équivalentes quant à la voie courante, l'une ou l'autre pouvant prendre l'avantage en fonction de paramètres extérieurs tels que le tracé, les matériels roulants... aucune approche n'est à rejeter.

Proposition pour le V400

Afin de maintenir les coûts actuels de maintenance à V300 (minimiser l'impact sur le LCC), l'approche proposée de **voie ballastée** à V400 dans un contexte adapté :

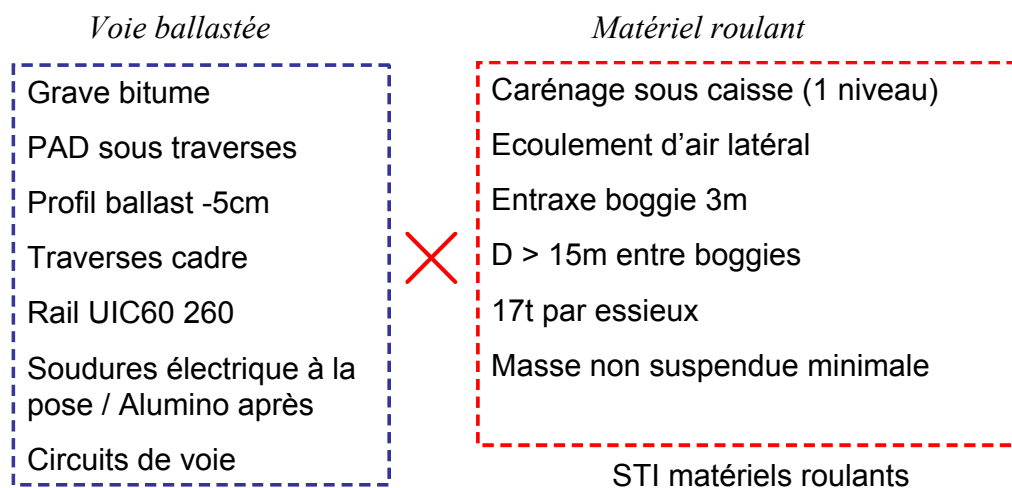


Figure 18: Concept de voie ballastée à V400 en France

Les solutions de voie ballastée et de voie sur dalle pour le V400 peuvent être économiquement les plus efficaces en fonction du contexte d'exploitation de la ligne à grande vitesse considérée et, bien sûr, du type de matériel roulant. Une troisième voie peut même être envisagée afin de « moderniser » les lignes à grande vitesse existantes. Faisons le tour de ces trois propositions :

- la voie sur dalle ;
- la voie ballastée modernisée ;
- la troisième voie.

Considérons le cas où :

- le réseau est fortement maillé, permettant des reports aisés sur le réseau conventionnel ;
- la ligne peut être fermée au trafic le cas échéant plusieurs jours, voire un à deux mois ;

- le financement des infrastructures neuves est assurée par ailleurs dès qu'elles ont servies plus de 13 ans ;
- les contraintes au niveau du matériel roulant sont faibles (matériels conventionnels et autres) ;
- le tracé est particulièrement rectiligne et plan ;
- le niveau de compétence dans la maintenance de la voie est faible (export)...

Alors :

La voie sur dalle est sans conteste la meilleure solution technico-économique et peut atteindre, sous réserves d'améliorations dans la maîtrise de sa raideur, la vitesse commerciale de 400km/h.

NB : le maintien des circuits de voie constitue un plus indéniable en matière de sécurité et de réduction des coûts de maintenance de la voie. De plus, les circuits de voie sont nécessaires aux postes d'aiguillage de certains réseaux

Considérons le cas où :

- le réseau n'est pas maillé (réseau en étoile), ne permettant pas des reports sur le réseau conventionnel ;
- la ligne ne peut être fermée au trafic le cas échéant plus d'une nuit ;
- le financement des infrastructures neuves et leur maintenance est assurée par gestionnaire d'infrastructure ;
- les contraintes au niveau du matériel roulant sont claires et fortes (pas de matériels conventionnels où alors avec un coût de péage supplémentaire) ;
- le tracé n'est pas particulièrement rectiligne et plan ;
- le niveau de compétence dans la maintenance de la voie est fort...

Alors :

La voie ballastée est sans conteste la meilleure solution technico-économique et peut atteindre, sous réserves d'améliorations (grave bitume, PAD, traverses cadre...) la vitesse commerciale de 400km/h

NB : les circuits de voie assurent naturellement leur rôle de détection du rail cassé (même si la signalisation n'en a pas besoin en ligne par ailleurs, cf. ERTMS niveau 3), et celle d'enclenchement pour les postes d'aiguillage de certains réseaux...

Considérons le cas où :

- la ligne est existante ;
- les conditions précédentes (réseau, tracé, matériel roulant...) sont réunies pour conduire objectivement à une voie sur dalle ;
- la ligne ne peut être fermée au trafic le cas échéant plus d'une nuit ;
- le financement des infrastructures neuves et leur maintenance est assurée par gestionnaire d'infrastructure ;
- ...

Alors :

Une troisième voie peut être explorée « la dalle à cadres multiples posée sur lit de ballast »

Au fur et à mesure du renouvellement de la voie ballastée, sont posés des dalles cadres aux dimensions telles que leur bourrage mécanique est possible. Leur géométrie permet un ancrage transversal élevé malgré un niveau de ballast réduit, une élévation du rail...

Cette solution doit pouvoir d'atteindre dans de bonnes conditions économiques la vitesse commerciale de 400km/h.

Conclusion

Les résultats de l'analyse LCC peuvent être sensiblement différents selon le périmètre d'analyse, la prise en compte ou non :

- des surcoûts d'exploitation liées aux interruptions de circulation / fonction de la topologie du réseau ;
- de la nature des circulations, vitesse et empattement
- de la nature des sous-sols ;
- des impacts sur la signalisation et les objectifs de sécurités (rail cassé...)

Une analyse LCC limitée aux charges d'entretien et de renouvellement de la voie montre que les solutions Voies ballastées et Voies sur dalles sont objectivement équivalentes

Selon la topologie des réseaux (existence ou non de voies alternatives) et la nature des circulations (couplage vitesse – empattement des boggies, taux de glissement, aérodynamique...) les résultats économiques montrent que la voie ballastée garde toute sa pertinence sur :

- le réseau conventionnel et le renouvellement des lignes à grande vitesse ;
- les lignes à grande vitesse, a minima jusqu'à des vitesses de 400 km/h

Le choix est à faire par le gestionnaire d'infrastructure en fonction d'orientation d'ingénierie de maintenance, de critères de sécurité (rail cassé) et de choix d'exploitation (block permissif, philosophie des postes d'aiguillage)

Les deux solutions sont complémentaires et non exclusives.

La voie ballastée «moderne» définie précédemment, avec du matériel roulant en accord, permet d'envisager sûrement :

- une vitesse de 400km/h avec des coûts de maintenance équivalent à ceux d'une ligne à V300
- des coûts d'entretien et une politique de renouvellement compatibles avec ceux des lignes actuelles

Le problème est un problème « système », il est illusoire de ne considérer que l'aspect « voie » sans considérer les aspects matériels roulant, topologie du réseau et acceptabilité d'un certain niveau de risque

Ce n'est pas aux constructeurs des nouvelles voies de nous imposer de nouvelles « modes » qui ne sont pas l'optimum pour les gestionnaires d'infrastructure.

