

14

REFERENCE

FER064712

CAHIER

223

RGCF

2009-01, n° 179, p. 15-27, graphiques, schémas, bibliographie p. 27 - (REVUE) - S/C : 0301

Modélisation du lien économique entre entretien et régénération. Voie courante et signalisation

CGS

Modélisation du lien économique entre entretien et régénération

Voie courante et signalisation

Marc ANTONI et Carolina MEIER-HIRMER

Afin d'optimiser les dépenses de maintenance du réseau, la Direction de l'Infrastructure de la SNCF a cherché à formaliser le lien existant entre les coûts d'entretien et les volumes d'installations renouvelées. Pour chaque composant, on bâtit le modèle de coût de maintenance (coût d'entretien et coût de régénération) à partir d'un modèle de défaillance. Appliquée par consolidation à la voie complète, la méthode permet d'associer, à chaque hypothèse de cycle de maintenance une courbe de coût. La comparaison des diverses courbes permet de retenir le cycle optimal.

■ Modelling the economic link between maintenance and regeneration

Track and signalling

To optimise network maintenance expenditure, the SNCF Infrastructure Department has done work to formalise the link between maintenance costs and the volumes of installations renewed. For each component, a model of the maintenance cost (maintenance cost and regeneration cost) is established, based on a component's failure model. The method is then consolidated to apply to the track of the entire line, associating a cost curve with each maintenance cycle hypothesis. The optimal cycle is obtained by comparing the various curves.

■ Modellierung des wirtschaftlichen Zusammenhangs zwischen Instandsetzung und Erneuerung

Durchgehendes Gleis und Signalleitung

Um die Instandhaltungskosten des Netzes zu optimieren, hat die Direktion für Infrastruktur der SNCF versucht, den zwischen den Instandhaltungskosten und dem Umfang an erneuerten Anlagen bestehenden Zusammenhang zu formalisieren. Für jedes Bauteil wird anhand eines Störungsmodells ein Modell der Instandhaltungskosten (Instandsetzungs- und Erneuerungskosten) erstellt. Die durch Konsolidierung auf das vollständige Gleis angewandte Methode ermöglicht es, jeder Hypothese zum Instandhaltungszyklus eine Kurve der Kosten zuzuordnen. Aus dem Vergleich der verschiedenen Kurven lässt sich der optimale Zyklus ermitteln.


sessions de cette édition se penchaient sur l'état de l'infrastructure. La Direction de l'Infrastructure y a notamment présenté une méthode d'estimation des futurs besoins de maintenance de la SNCF, présentation pour laquelle elle a obtenu le premier prix infrastructure.

Depuis la création de RFF, l'infrastructure assure la mission d'entretien de l'ensemble du réseau. Sa rémunération est actuellement forfaitaire, la négociation annuelle de ce forfait restant très globale. Au cours des années passées, RFF et la SNCF ont envisagé les conséquences d'un effort significatif de régénération sans pouvoir se mettre d'accord sur ses éventuelles conséquences sur la baisse des coûts d'entretien et le vieillissement du réseau.

Une problématique commune à tous les gestionnaires d'infrastructure ferroviaire est la formalisation du lien économique entre les coûts d'entretien et les volumes d'installations renouvelées. L'optimisation de la maintenance est d'ailleurs apparue au WCRR08¹ comme une préoccupation majeure du monde ferroviaire. Trois

¹ Congrès mondial de la recherche ferroviaire qui s'est tenu à Séoul (Corée) en mai 2008.

Le Direction d'affaire CSC ER (ingénierie de maintenance) de la Direction de l'Infrastructure a été chargée de faire le point des méthodes existantes et, si nécessaire, de développer une méthode permettant de répondre, au moins qualitativement, aux questions suivantes :

- Peut-on trouver un optimum économique entre entretien et régénération sur le réseau actuel ?
- Quelles seraient les conséquences sur les coûts d'entretien, du maintien ou d'une évolution sensible des budgets de régénération ?
- L'usage qui est fait actuellement des budgets de régénération est-il optimal ?

Ce dossier résume deux études menées en cette direction. La première grande partie concerne la maintenance de la voie courante, la deuxième partie la maintenance des appareils de signalisation.

Études antérieures

D'une manière générale, les études antérieures de la SNCF reposent sur des estimations du coût moyen national d'entretien des voies par groupe UIC avec l'hypothèse implicite que le niveau de la régénération actuel permet d'éviter tout vieillissement du réseau. Leurs résultats ont conduit à la définition de « points de charges » ou points VT². Simples d'utilisation, ces indicateurs ne permettent pas réellement d'estimer les variations de coûts d'entretien consécutives au vieillissement des voies et aux variations de leurs conditions d'utilisation.

En 2001, RFF [4] a développé un modèle pour lui permettre de fonder sa réflexion sur la régénération. Ce modèle n'a pas fait l'objet d'une mise en commun avec la SNCF. Il intègre

des lois de défaillance sans prendre en compte le vieillissement du système. La démarche considère notamment que les matériels sont réparables à l'infini, à coût constant et avec une durée de vie identique à celle du matériel neuf, n'interagissant pas avec les matériels plus anciens restant en place.



Définitions: Le terme « entretien » est utilisé pour désigner le remplacement d'un élément (rail, traverse...) à l'unité, uniquement quand c'est nécessaire.

Le terme « régénération » est utilisé pour le remplacement massif permettant de concentrer les moyens et de limiter la gêne due aux travaux : on remplace alors, à moindre coût, des éléments qui auraient pu durer encore plusieurs années.

Généralités

La construction du modèle économique décrit dans le présent dossier repose sur un modèle de défaillance des constituants d'un sous-ensemble de l'infrastructure, ici la voie, modèle sur lequel on applique ensuite des coûts unitaires de remplacement par voie d'entretien ou de régénération.

Nous expliquerons la construction du modèle de défaillance : loi de défaillance d'un constituant non remplacé puis d'un constituant remplacé, influence de l'environnement sur la durée de vie (vieillissement). Puis nous décrirons la construction du modèle de coût. Nous poursuivrons par l'application à la voie courante et au réseau national.

Composant unique non remplacé

On peut définir un modèle de défaillance par son taux de défaillance

$\lambda(t)$, celui-ci représentant la probabilité d'observer une défaillance instantanée sachant que le composant n'a pas eu de défaillance avant t . Lorsque des composants ne sont soumis ni à usure ni à vieillissement, on peut considérer une loi dont le taux de défaillance est constant. On obtient alors la loi exponentielle décrite par :

- son taux de défaillance : $\lambda = \text{constant}$
- sa densité de probabilité : $f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$
- sa fonction de répartition : $F(t) = 1 - \exp(-\lambda \cdot t)$

Pour des composants mécaniques, on utilise classiquement des lois dont le taux de défaillance est une fonction « puissance » du temps : elles représentent très bien la réalité. On obtient alors une autre loi de défaillance : la loi de Weibull. On peut la décrire par :

- son taux de défaillance : $\lambda(t) = (1/\eta^\beta) \beta \cdot t^{\beta-1}$
- sa densité de probabilité : $f(t) = (1/\eta^\beta) \beta \cdot t^{\beta-1} \exp(-(t/\eta)^\beta)$
- sa fonction de répartition : $F(t) = 1 - \exp(-(t/\eta)^\beta)$

Deux paramètres interviennent dans une loi de Weibull :

- le paramètre de « forme » β qui traduit la répartition des défaillances dans le temps :
 - lorsqu'il est faible, les défaillances apparaîtront de manière répartie au cours du temps ;
 - lorsqu'il est élevé, les défaillances apparaîtront sur une période courte ;
- le paramètre d'« échelle » η , qui fixe l'échelle de temps.

Lorsque $F(t)$ s'approche de la valeur 1, l'ensemble de la population mise en service à la date $t = 0$ est défaillante. Les systèmes non soumis à une « usure » peuvent être modélisés par ce type de loi de défaillance avec $\beta = 1$ (la loi exponentielle est un cas particulier de la loi de Weibull). Les fonctions obtenues (représentées en variable réduite $tr = t/\eta$) sont données par la figure 1.

² Le point VT est un indicateur de la charge d'entretien des installations de la voie, des installations de signalisation et des ouvrages d'art, fondé sur une segmentation technique et d'usage.

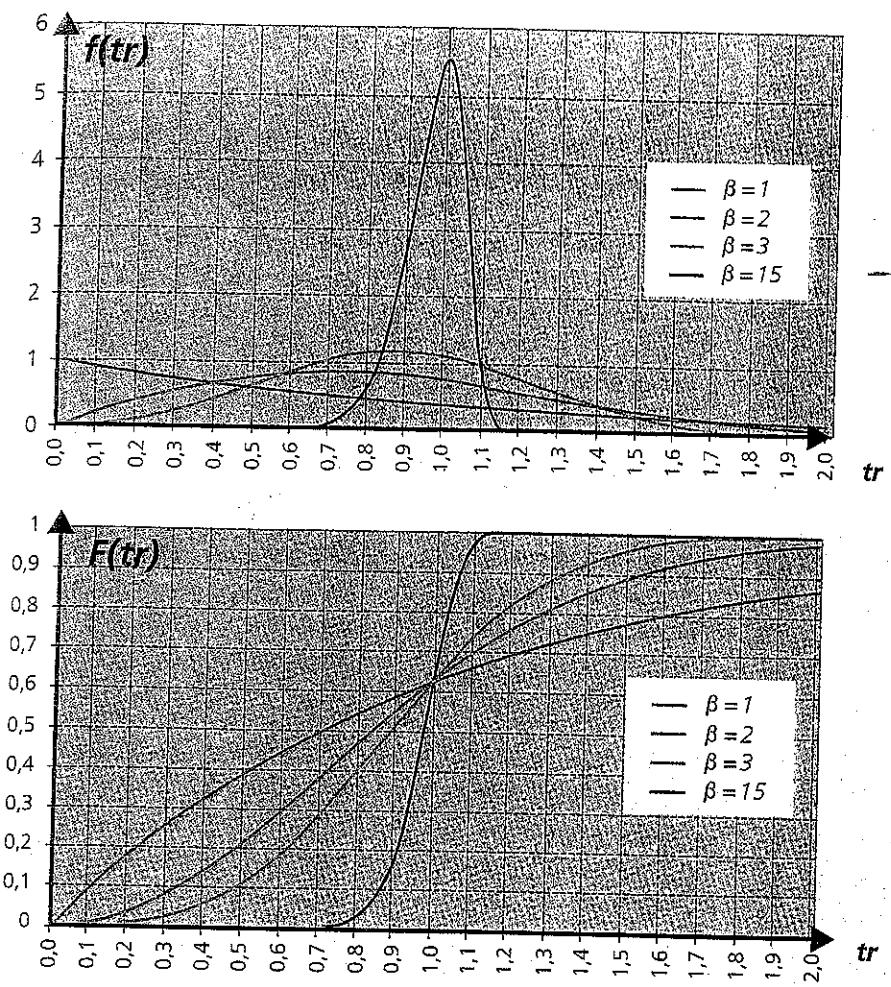


Fig. 1

L'espérance de vie E est dans nos cas proche de :

$$\eta : E = 0,90 \cdot \eta \text{ si } \beta = 3 \text{ et } E = 0,98 \cdot \eta \text{ si } \beta = 15.$$

Pour certains constituants, il s'avère que la loi de défaillance est composée de deux lois. Il est alors habituel de considérer que la loi de survie associe successivement deux périodes : l'utilisation courante avec un taux constant dans un premier temps et, enfin, la fin de vie avec un taux monotone croissant. Dans ce cas, la loi de défaillance dite de Bertholon peut être adoptée, notamment pour les systèmes électroniques ou électromécaniques à vieillissement avec l'usage (voir la deuxième partie du dossier sur le remplacement des composants de signalisation).

compte de l'effet des remplacements successifs. Un matériel défaillant est remplacé par un matériel neuf qui, à son tour, sera soumis à l'usure ou au vieillissement... On définit alors la densité de renouvellement $h(t)$ qui indique le nombre de remplacements à effectuer à l'instant t . On montre que cette fonction s'écrit alors comme une somme de n -convolutions :

$$h(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f(t)^{*n}$$

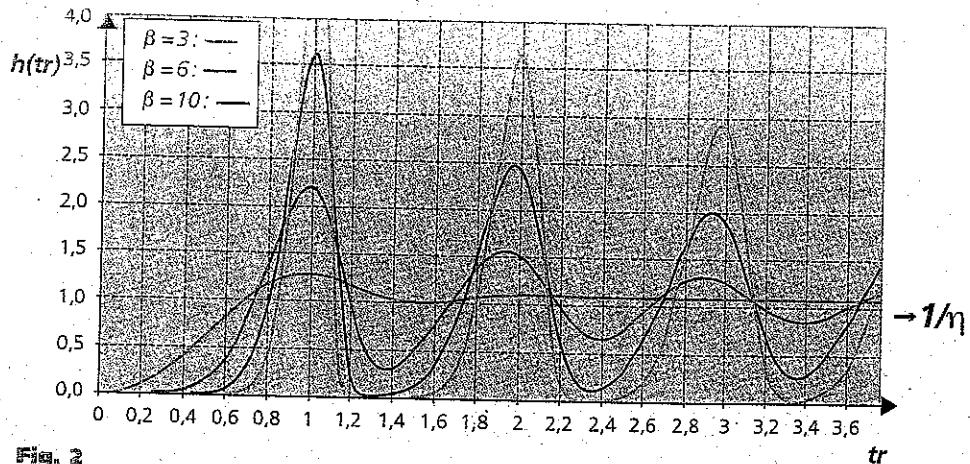


Fig. 2

Remplacements successifs d'un composant

En pratique pour des composants en service, il est nécessaire de tenir

où $*$ désigne la convolution. Il n'existe pas d'expression analytique simple de cette fonction, même en considérant le cas particulier d'une loi de Weibull. L'expression peut néanmoins être calculée numériquement. La figure 2 fait apparaître l'influence des paramètres η et β sur l'amplitude des ondulations de la fonction $h(t)$. On constate l'existence d'une valeur limite vers laquelle le système converge plus ou moins rapidement.

On notera que pour un paramètre β faible, les défaillances sont réparties dans le temps et le recouvrement entre remplacements successifs conduit à une atténuation rapide des pics de remplacement. Dès le deuxième cycle de remplacement, le nombre de défaillances est proche de la valeur limite. Pour un paramètre β élevé, les défaillances sont concentrées dans le temps, le recouvrement entre remplacements successifs est faible et l'atténuation des pics de remplacements est très progressive.

À ce stade, nous considérons implicitement que les composants sont remplaçables à l'infini sans réduction de leur espérance de vie. Cette hypothèse pourrait être admise dans le cas d'un système interagissant peu avec son environnement. Ce n'est pas le cas pour les constituants auxquels nous nous intéressons. Le vieillissement d'une traverse dépend de l'état des traverses encadrantes, du ballast, des attaches, du rail...

De même, pour un long rail soudé (en atelier), la réparation d'une rupture va créer deux soudures (réalisées en voie), points singuliers en terme de nivellement et plus fragiles : au fil du temps on obtient plus en plus de coupons de 6 à 12 m soudés en voie ; le comportement de cet ensemble est très différent du rail initial. En fait, le système à l'intérieur duquel se trouve la population de composants vieillit. Chaque composant, neuf ou de réemploi, se trouvera alors sollicité dans des conditions qui ne sont plus celles d'origine et sa durée de vie s'en trouvera progressivement réduite au fil du temps.

■ Remplacements successifs d'un composant avec prise en compte du vieillissement du système

L'approche précédente considère que les composants sont remplaçables à l'infini sans réduction de leur espérance de vie, ce qui ne nous semble pas correct. Dans la réalité, le système à l'intérieur duquel se trouve la population de composants vieillit.

Afin de représenter au mieux ce phénomène, nous avons introduit un troisième paramètre, le taux K de réduction de la durée de vie à chaque remplacement de composant : $\eta_n = \eta_{n-1} \cdot K = \eta_0 \cdot K^n$, où n est le rang du remplacement.

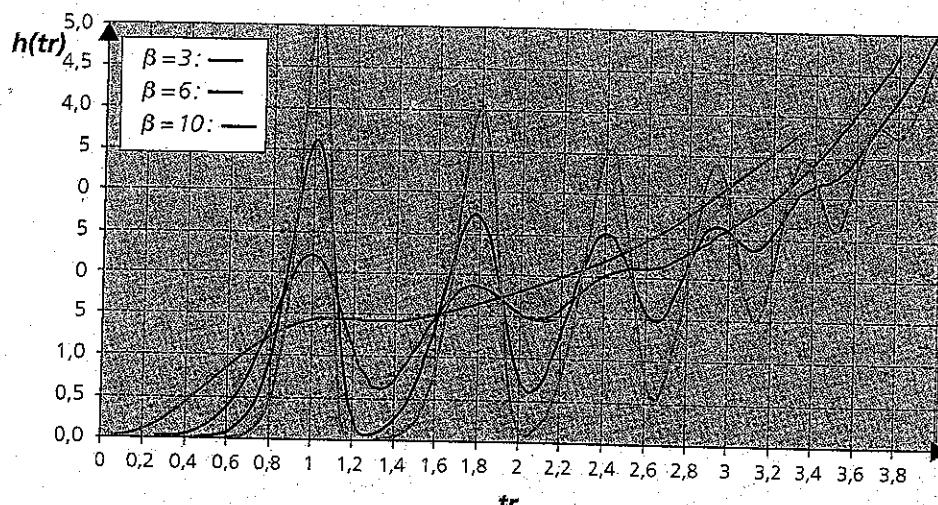


Fig. 2

Ce paramètre K dépend du matériel et de son environnement. Il a été estimé à partir du retour d'expérience. L'introduction d'un facteur K conduit à ce qu'un composant remplacé un grand nombre de fois a, dès sa pose, une durée de vie très courte.

Cette représentation est satisfaisante, par exemple :

- on a pu constater la mise hors d'usage de traverses neuves en 2 ou 3 ans lorsqu'elles ont été introduites sans précaution particulière dans une voie dont les autres composants sont eux-mêmes fatigués ;
- les appareils électriques ont des caractéristiques qui évoluent avec le temps : en remplaçant un composant d'une carte électronique, celui-ci va être sollicité dans une plage de fonctionnement différente de ce qu'elle aurait été avec des composants neufs. Et plus ses « voisins » sont vieux et ont eux-mêmes été remplacés, moins l'ensemble vivra longtemps. Ce phénomène a été mis en évidence de manière très nette.

La figure 3 illustre l'augmentation des remplacements nécessaires à mesure que le système vieillit, avec $K = 80\%$.

Ainsi apparaît la croissance des remplacements nécessaires liée au vieillissement du système. Ce point est plus particulièrement important pour les sous-systèmes sans avenir de régénération.

■ Du modèle de défaillance au modèle de coût

Le modèle de défaillance défini précédemment nous permet d'aboutir simplement au modèle de coût recherché pour le composant en question.

Le **coût d'entretien** annuel se compose d'une part, d'un coût lié aux défaillances entraînant des remplacements de constituants (produit du coût unitaire c_u de remplacement et du nombre de remplacements à effectuer) et, d'autre part, d'un coût $c(t)$ non directement lié aux remplacements de constituants (opérations de surveillance et d'entretien courant).

Ainsi pour une installation neuve à la date $t = 0$, le coût d'entretien à l'instant t s'écrit :

$$Y(t) = c(t) + c_u \cdot n \cdot h(t)$$

où n est le nombre de constituants de l'installation et $h(t)$ est la densité de renouvellement à l'instant t .

Le coût d'entretien cumulé à la date T s'écrit alors :

$$E(T) = \sum_{t=0}^{T-1} \int_t^{t+1} Y(s) ds$$

Le **coût de régénération** X est pris constant. Il provient des coûts constatés.

Le **coût de maintenance** avec régénération est défini comme la somme des coûts d'entretien et de régénération sur la période T .

Le **coût d'indisponibilité** : la défaillance d'un composant puis son remplacement conduisent à une restriction ou une interdiction de circulation sur l'installation. Cet arrêt a des conséquences en termes de régularité ou éventuellement financières (remboursement des clients, adaptation des roulements...). Ceci est vrai aussi pour les travaux de régénération. Dans ce cas, par contre, les effets de l'indisponibilité peuvent être réduits (adaptation des horaires, substitution par autocar...). Ce « coût



(Photo Marc Antoni)

tion des paramètres du modèle de défaillance – β , η , K –, et du rapport entre les coûts de remplacement par régénération X et par voie d'entretien Y .

d'indisponibilité » est fonction de l'intensité d'utilisation des installations, de la sensibilité de l'exploitation aux perturbations, de l'aptitude de l'installation à gérer les situations perturbées... Il intervient à l'évidence dans les décisions prises : le seuil de défauts de rails cumulés sur LGV à partir duquel RFF décide une régénération est sensiblement plus faible que pour une voie moins sollicitée. Le modèle présenté dans ce dossier n'intègre pas cet élément.

Nous avons retenu l'unité monétaire comme unité de mesure du volume de travail à réaliser. S'agissant d'un flux « technique », les aspects économiques (en particulier une éventuelle actualisation...) n'ont pas lieu d'être. Ils pourraient être facilement intégrés dans le cadre d'applications « projet » de nos modèles...

■ Coût annuel moyen de maintenance et période optimale de régénération

Afin de considérer la « dépense moyenne » le long de la vie d'une installation, nous définissons le coût moyen annuel de maintenance avec régénération périodique par l'expression :

$$C(T)/T = [X + E(T)]/T \text{ en €/an}$$

Les figures 4 et 5 illustrent la décomposition et l'évolution du coût annuel moyen de maintenance pour différentes valeurs du paramètre β et avec $\eta = 1$.

Le minimum de coût définit la période optimale de régénération T_0 . Cette période est directement fonc-

Pour un composant de paramètre β élevé la période optimale de régénération T_0 est peu sensible au rapport X/Y et le minimum est marqué. À l'inverse, pour un β faible, la période optimale de régénération n'existe que si le rapport X/Y est suffisamment faible. La période optimale T_0 traduit le moment à partir duquel la poursuite de l'entretien n'est plus la meilleure solution économique.

Composant avec $\beta=3$ $\eta=1$ $K=0,8$ et $X/Y=0,5$

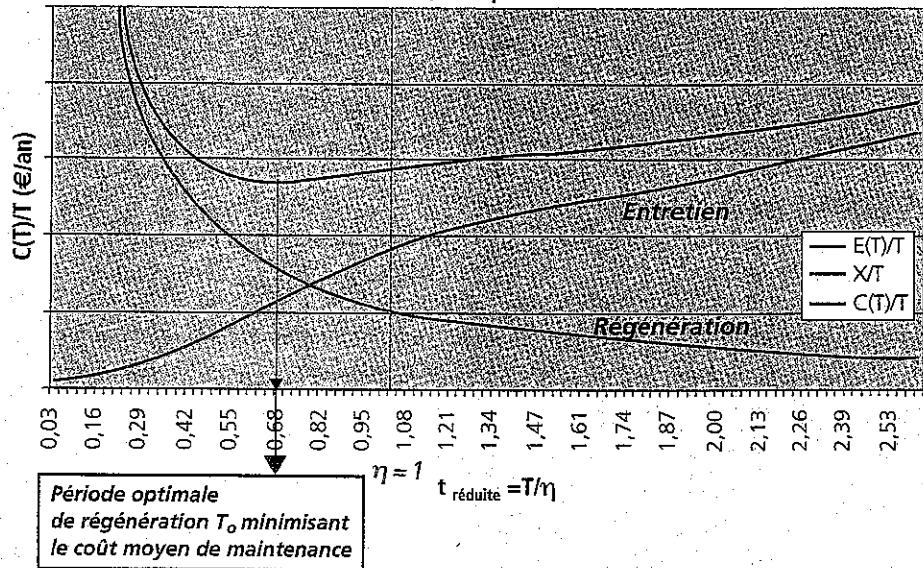


Fig. 4

Composant avec $\beta=15$ $\eta=1$ $K=0,8$ et $X/Y=0,75$

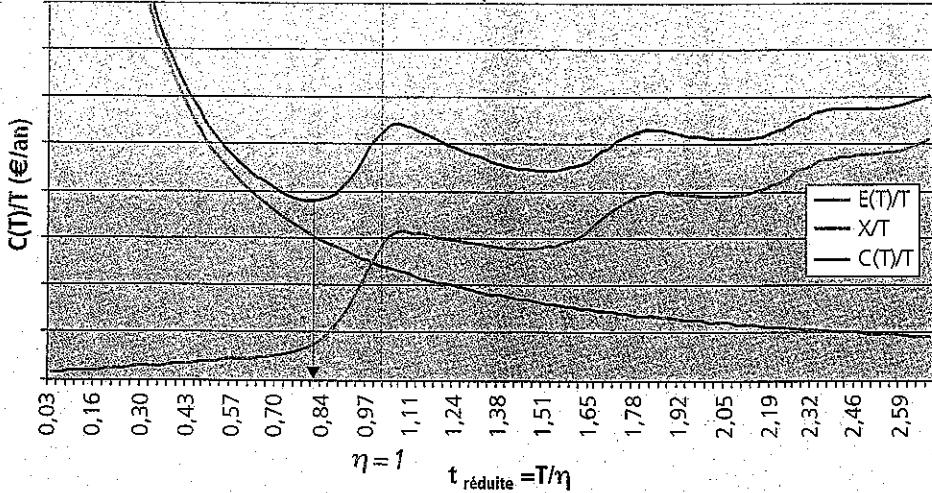


Fig. 5

■ Application à la voie courante

Une voie est constituée de plusieurs types de constituants : la fonction de coût de la voie est la somme des fonctions de coûts de ceux-ci. Pour modéliser l'ensemble du réseau national, il faut pouvoir définir les lois de défaillance de chaque composant. Afin de simplifier ce problème, nous avons opté pour la création de catégories assez classiques (voies des groupes UIC 2 à 4, 5 et 6, 7 à 9 avec voyageurs) pour lesquelles nous avons recherché des paramètres pour les constituants. Pour ceux-ci, nous avons différencié 4 types de rails (profils U60 ou U50, rails en LRS ou en barre normale) et 2 types de traverses (traverse en béton ou en bois). Le modèle réalise un calcul pour chaque catégorie (par exemple pour les voies UIC 5 et 6 équipées de LRS en rail U50 et de traverses en béton armé).

Paramétrage du modèle

L'estimation des paramètres de fiabilité des composants élémentaires de la voie s'avère être une étape délicate où l'exploitation du retour d'expérience est essentielle :

- pour les rails, l'expérience accumulée est déjà ancienne. Il est bien établi que β est faible quel que soit le type de rail et de pose. Le facteur d'échelle η est défini par le profil et l'usage qui en est fait, représenté principalement par le tonnage annuel moyen et dans une moindre mesure par le type de pose. Nous avons montré qu'un taux K de réduction de l'espérance de vie de 80 % représente assez fidèlement la réalité ;
- pour les traverses en béton, nous avons retenu $\eta = 55$ ans pour les voies des groupes UIC 2 à 4 et $\eta = 60$ ans pour les autres voies. Le paramètre β est plus important que pour les rails. Les traverses en bois n'étant pas de même qualité et de mêmes dimensions selon les groupes de voies, leurs facteurs de forme β sont plus faibles. Les traverses étant sensibles au vieillissement du système (rail, ballast, plate-forme), nous avons retenu un taux K de 75 % ;
- lors de la présente étude, nous ne disposons pas encore d'un modèle

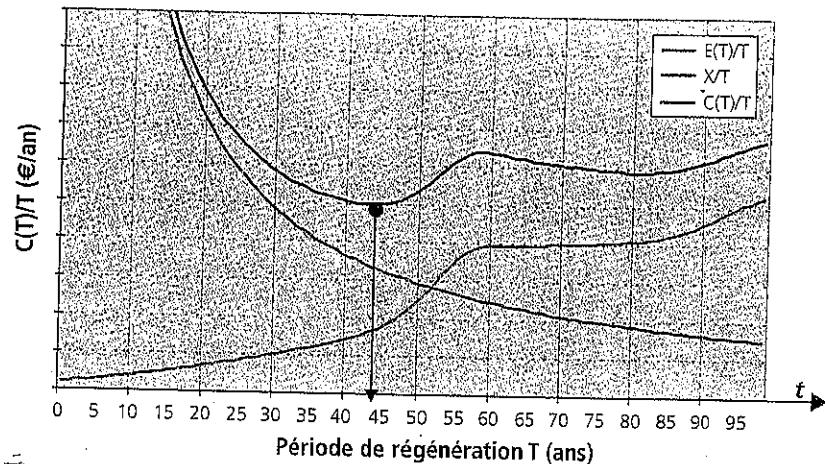


Fig. 6

satisfaisant pour le ballast, c'est au travers des coûts non liés aux remplacements que nous avons traduit son vieillissement (coûts croissant plus ou moins rapidement au cours du temps selon qu'une politique de meulage systématique est effective ou non).

Les coûts de remplacement des composants élémentaires de la voie (en entretien et en régénération) sont issus d'une analyse des données comptables. Les coûts liés au nivellement, aux consolidations de traverses et à la surveillance sont repris dans les coûts $c_i(t)$ des traverses.

Recherche d'un optimum économique

Une politique de régénération peut s'exprimer, pour une voie donnée, par la période de régénération retenue T . Le modèle permet de calculer les coûts d'entretien année par année au cours de cette période de temps. Ces coûts annuels d'entretien ajoutés au coût de

régénération pour la période T , représentent le coût de maintenance sur le cycle complet $C(T)$. Il peut être ramené à une valeur moyenne annuelle pour pouvoir comparer l'efficacité de différentes politiques de maintenance et rechercher un optimum. À titre d'exemple, considérons une voie moderne de groupe 3 posée neuve à l'année $t = 0$. Pour rechercher la période T_0 , nous avons estimé l'évolution du coût de maintenance cumulé ramené à la période T de régénération, $C(T)/T$ (cf. figure 6).

Dans ce cas, l'optimum se situe à 43 ans. On voit apparaître que, dans ces conditions, le coût de régénération représente les 2/3 des coûts de maintenance ; le rapport 2 (régénération) pour 1 (entretien) est couramment admis par les réseaux européens. Il apparaît de plus que si l'on détend le rythme des régénérations, ce rapport ne tarde pas à s'inverser. La figure 7 illustre l'évolution du coût annuel d'en-

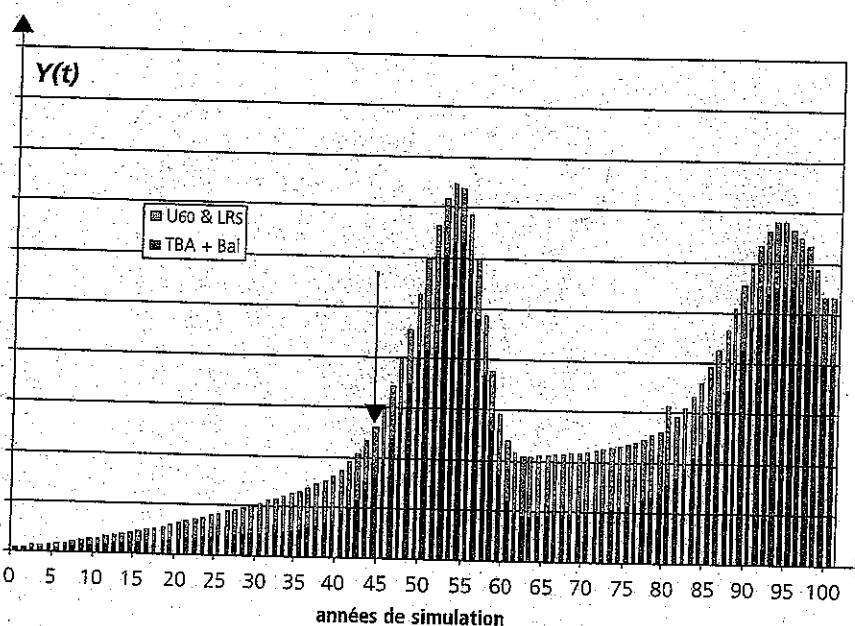


Fig. 7

tretien en fonction du temps. Elle distingue la part des dépenses relatives au rail (ici U60 en LRS) du reste (traverses en béton et ballast).

■ Extension au réseau national

L'objectif est de chercher, pour un niveau de régénération donné, l'évolution dans le temps du coût d'entretien du réseau existant aujourd'hui. Pour réaliser ce calcul, nous avons appliqué les modèles de coûts par catégorie (cf. précédemment) aux longueurs réelles du réseau actuel pour chacune de ces catégories.

■ Coûts actuels

Le modèle appliquée aux données actuelles (coûts unitaires et description du réseau) n'a pas nécessité de re-calibrage : les coûts d'entretien estimés sont proches de ceux effectivement constatés. Ce résultat renforce le bien-fondé de l'approche et des paramètres obtenus.

■ Evolution des coûts annuels d'entretien

Le modèle permet de calculer, pour chaque groupe de voie UIC, l'évolution du coût d'entretien $Y(t)$ au cours

du temps pour différents niveaux annuels de régénération supposés constants (figures 8 et 9).

Selon ces calculs il est possible de déterminer par catégories les sommes à consacrer aux régénérations pour stabiliser le coût d'entretien annuel à sa valeur actuelle et par là les longueurs de voies à renouveler. Il est aussi possible d'examiner les évolutions du niveau de l'entretien en augmentant sensiblement les niveaux de régénération au-delà de cette valeur d'équilibre. Inversement, le modèle conduit à penser que le maintien du niveau actuel de la régénération de la voie et de l'entretien qui lui est consacré va conduire à un vieillissement inéluctable du réseau.

Approche probabiliste appliquée aux composants de signalisation

Définitions: Le terme « composant de sécurité » de la signalisation est utilisé pour désigner un ensemble fonctionnel qui, mis en oeuvre 24h sur 24, assure une ou plusieurs fonctions de signalisation avec un taux horaire de défaillance non sûre inférieur à une valeur fixée par les normes (en l'occurrence $10^{-9}/h$ ce qui correspond au niveau SIL4 de la norme EN50126). Dans ce cas, presque tout défaut interne se traduit par une défaillance sûre, c'est-à-dire restrictive quant à la circulation des trains.

Il est à noter que pour les composants de sécurité portant du logiciel, dont les défauts sont par nature systématiques, ceux-ci n'entrent pas dans le calcul de ce taux. Des méthodes spécifiques doivent montrer que, pour un ensemble de postulats de fonctionnement décrivant les conditions d'usage, tels défauts systématiques n'existent pas. En effet, ces composants restant en fonction sans limite de temps, si un tel défaut existait il donnerait nécessairement lieu à une défaillance non sûre... au bout d'un certain temps.

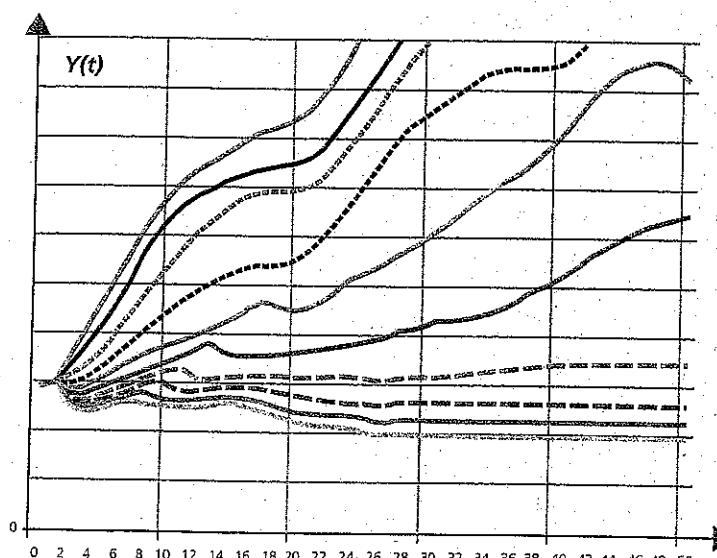


Fig. 8 (Voies des groupes 2 à 4 hors LGV)

↑ Niveau annuel de régénération décroissant
= Niveau actuel
↓ Niveau annuel de régénération croissant

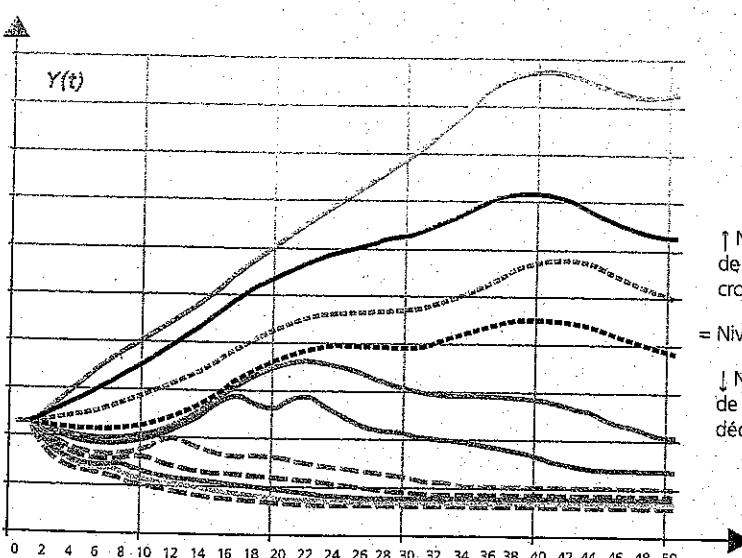


Fig. 9 (Voies des groupes 5 à 6)

Généralités

La construction d'un modèle économique inspiré de celui conçu pour la voie courante repose sur un modèle de défaillance des composants de sécurité, d'une association de ceux-ci pour les fonctions de signalisation utilisées par type de voie, modèle sur lequel on applique ensuite des coûts unitaires de remplacement par voie d'entretien ou de régénération. Pour ce faire, il est nécessaire d'estimer les lois de durée de vie des équipements de signalisation. En effet, si l'équipement de signalisation vieillit, la stratégie actuelle de maintenance, uniquement basée sur les remplacements curatifs, n'est peut-être pas optimale. Nous avons développé des modèles statistiques pour définir les stratégies de maintenance économiques en fonction des objectifs de fiabilités fixés (nombre de défaillances).

Afin de construire le modèle de défaillance, nous nous sommes intéressés à la distribution de la durée de vie pour un constituant non remplacé, en analysant l'impact de variables de l'environnement sur cette durée et en estimant le nombre attendu de composants à remplacer annuellement. Ensuite, nous décrivons l'élaboration du modèle de coût. Finalement, nous présentons les différents scénarios qui ont été créés pour analyser l'impact de plusieurs stratégies de maintenance sur le développement de réseau.

Approche probabiliste appliquée aux fonctions de signalisation

Composant unique non remplacé

Outre les lois précédemment rappelées, il apparaît que pour certains composants la partie droite de la courbe de défaillance présente une forme dite de « sortie de baignoire ». Il est alors naturel de considérer que

la loi de survie associe successivement deux périodes : l'utilisation courante avec un taux de défaillance constant dans un premier temps et, enfin, la fin de vie avec taux monotone croissant.

Dans ce cas la loi de **Bertholon** [2], [3] (modèle à risques concurrents, défauts aléatoires et défauts dus au vieillissement) peuvent être avantageusement utilisées.

- son taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{1}{\eta_0} \quad \text{si } t \leq t_0$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{\eta_0} + \frac{\beta}{\eta_1} \left(\frac{t - t_0}{\eta_1} \right)^{\beta-1} \quad \text{si } t \geq t_0$$

- sa densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{1}{\eta_0} \exp\left(-\frac{t}{\eta_0}\right) \quad \text{si } t \leq t_0$$

$$f(t) = \left[\frac{1}{\eta_0} + \frac{\beta}{\eta_1} \left(\frac{t - t_0}{\eta_1} \right)^{\beta-1} \right] \exp\left(-\frac{t}{\eta_0} - \frac{(t - t_0)}{\eta_1}\right) \quad \text{si } t \geq t_0$$

- sa fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\eta_0}\right) \quad \text{si } t \leq t_0$$

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\eta_0}\right) \cdot \exp\left(-\left(\frac{t - t_0}{\eta_1}\right)^\beta\right) \quad \text{si } t \geq t_0$$

Ici, $1/\eta_0$ désigne le taux de défaillance de la loi exponentielle, η_1 et β les paramètres de la loi de Weibull et t_0 l'origine du vieillissement. La fiabilité se calcule facilement car c'est la fiabilité d'une loi exponentielle avant t_0 puis le produit des fiabilités d'une loi exponentielle et d'une loi de Weibull après t_0 . De même, le taux de panne de la loi de Bertholon avant t_0 est celui d'une loi exponentielle puis après t_0 la somme des taux de pannes d'une loi exponentielle et d'une loi de Weibull. Il est aisément déduit la densité $f(t)$ de la loi proposée par Bertholon car elle est liée au taux de panne et à la fiabilité par la formule suivante : $f(t) = \lambda(t) \cdot (1 - F(t))$

Un algorithme a été développé avec l'aide de l'université de Marne-la-Vallée nous permettant de déterminer les quatre paramètres.

La forme du taux de défaillance $\lambda(t)$ est illustrée par la figure 10.

Estimation des lois de fiabilité et de leurs paramètres

La SNCF dispose d'une base de données appelée « Fichiers des Appareils de Signalisation ». Cette base, créée il y a de nombreuses

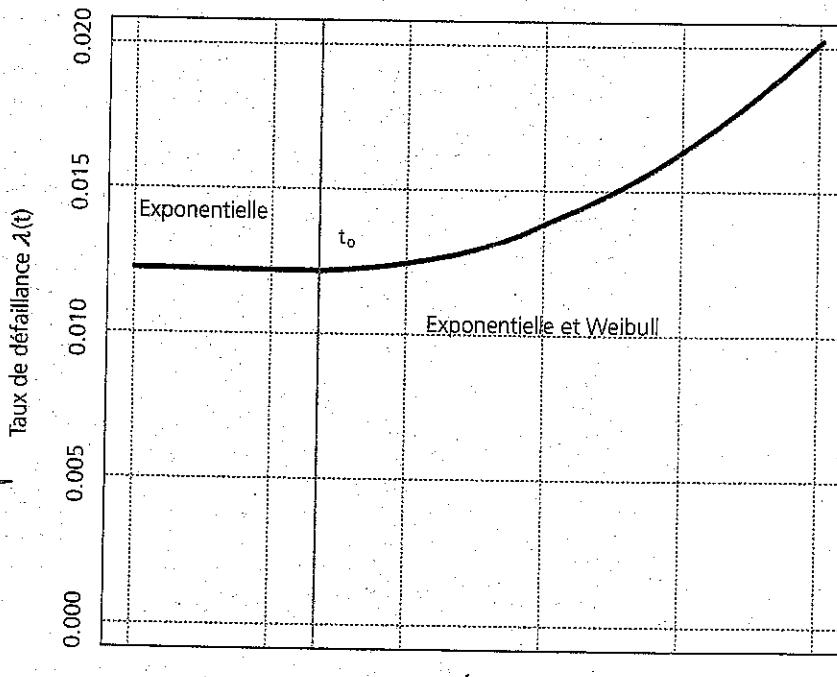


Fig. 10

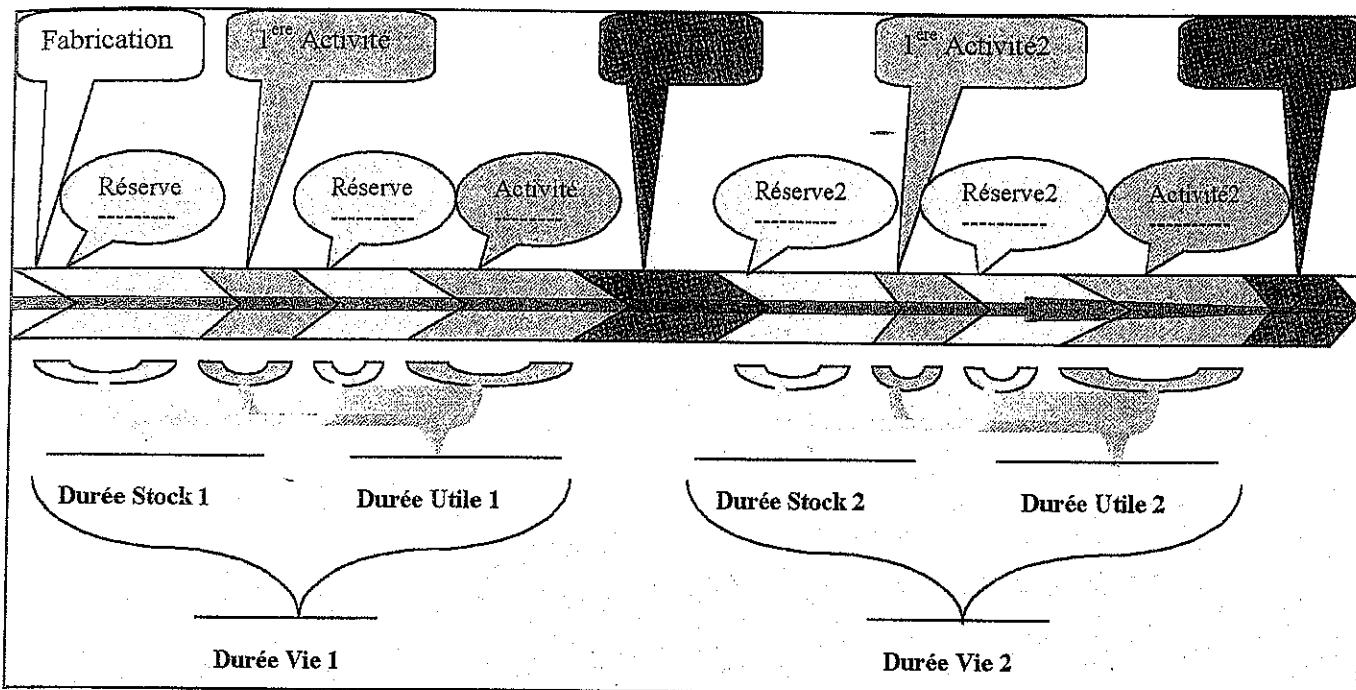


Fig. 11 - Cycle de vie d'un composant de signalisation

années, a été à l'origine conçue pour recenser l'ensemble des appareils de signalisation ainsi que les fonctions et leurs différents emplacements au cours de leur vie. Cette base a été utilisée pour élaborer le cycle de vie de chaque appareil ayant été mis en service sur le réseau (durées de stockage et de vie utile).

Dans l'étude, nous considérons que les caractéristiques de la première vie sont celles de la première phase d'utilisation. Compte tenu des mouvements auxquels est soumis l'ensemble du parc, cette décision constitue une approximation. Les informations complémentaires telles que le climat, la vitesse ou bien encore le groupe UIC ont été récupérées à l'aide d'autres bases de données.

Dans le cas des constituants de signalisation, la valeur du paramètre β de la loi de Weibull est faible. Pour les constituants de signalisation qui sont toujours en usage aujourd'hui, nous obtenons des données censurées. Nous utilisons le test de Kolmogorov-Smirnov pour vérifier si la distribution de Weibull est adaptée. Dans la quasi-totalité des cas, le phénomène de vieillissement est évident ($\beta > 1$).

Dans certains cas nous trouvons des phénomènes de vieillissement plus complexes que ceux modélisés par une simple distribution de Weibull. L'usage de la loi de Bertholon donne alors de très bons résultats.

A titre d'exemple, la figure 12 montre les résultats d'une estimation de durée de vie pour un bloc électrique de puissance. Ce type de constituant peut être réparé et il y a donc deux courbes de vie. La courbe en

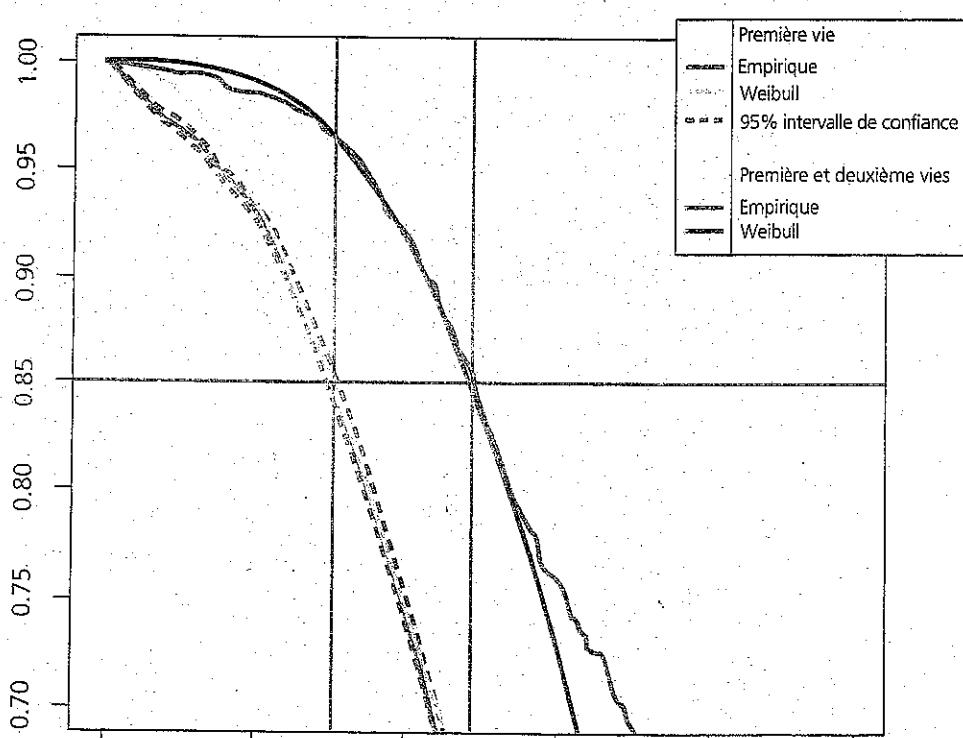


Fig. 12 - Estimation de la fiabilité d'un constituant de signalisation. Il y a deux durées de vie: la première est celle avant la réparation, la seconde est celle d'après

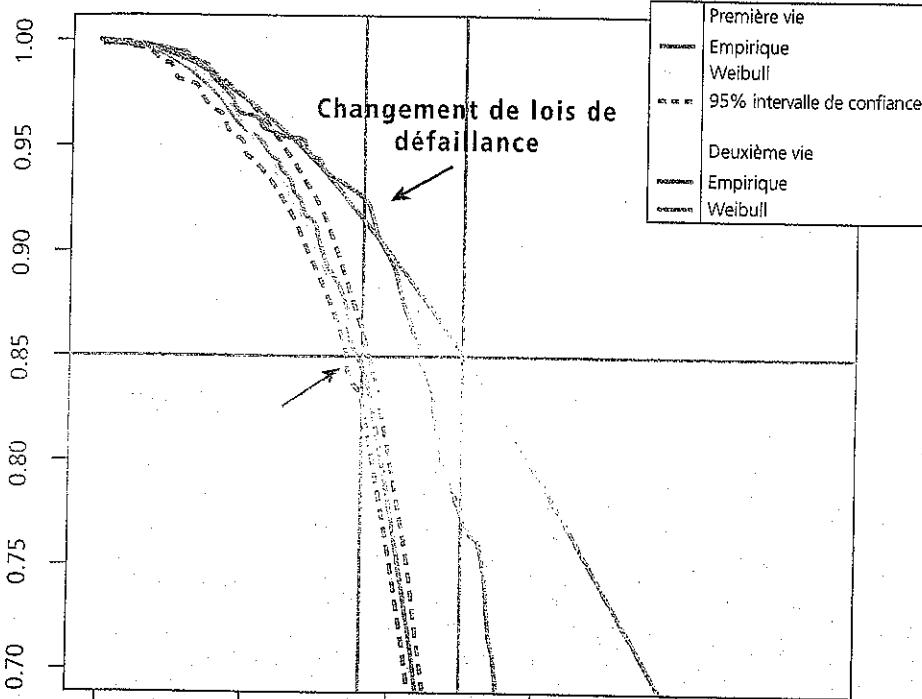


Fig. 13 - Estimation de la fiabilité d'un équipement électronique. Le modèle de Weibull n'est pas très bien approprié, on observe une inflexion de la courbe.

bleu foncé donne la somme de la première et de la deuxième vie.

Dans ce cas, la distribution de Weibull semble bien approximer la fiabilité empirique. La figure 13 montre un exemple d'un constituant électronique complexe dont la fiabilité ne peut pas être modélisée par une simple distribution de Weibull. Dans ce cas nous

utilisons une loi de Bertholon. Comme notre modèle global est constitué de plusieurs sous-modèles, nous devons seulement changer la contribution pour le calcul de la fonction $h(t)$. Le modèle de coût, par exemple, reste inchangé.

Il semble qu'il y ait en pratique deux raisons principales à cette croissance apparente des défaillances:

- en premier, le déclenchement au bout d'un certain temps de fonctionnement et/ou de stockage de phénomènes physiques (électrolyte de condensateurs...);
- en second, le cumul des dérives des différents composants internes est tel que le point de fonctionnement se rapproche des limites fonctionnelles admissibles pour un fonctionnement sûr. Des évolutions de certains paramètres d'environnement peuvent alors provoquer un incident alors qu'aucun composant n'est définitivement défaillant.

Facteurs d'influence

Notons qu'il y a de nombreux facteurs d'influence intervenant sur la vie des constituants, qu'ils appartiennent au constituant lui-même ou à son environnement. Par exemple, si le constituant électronique est installé à l'intérieur d'un centre d'appareillage, il a une distribution de durée de vie différente de celle d'un constituant installé sans protection à l'extérieur. Les facteurs d'influence utilisés dans l'étude sont: la vitesse maximale des circulations, le climat, la localisation géographique mais aussi la série du constituant électronique parmi tous les constituants réalisant la même fonctionnalité et,

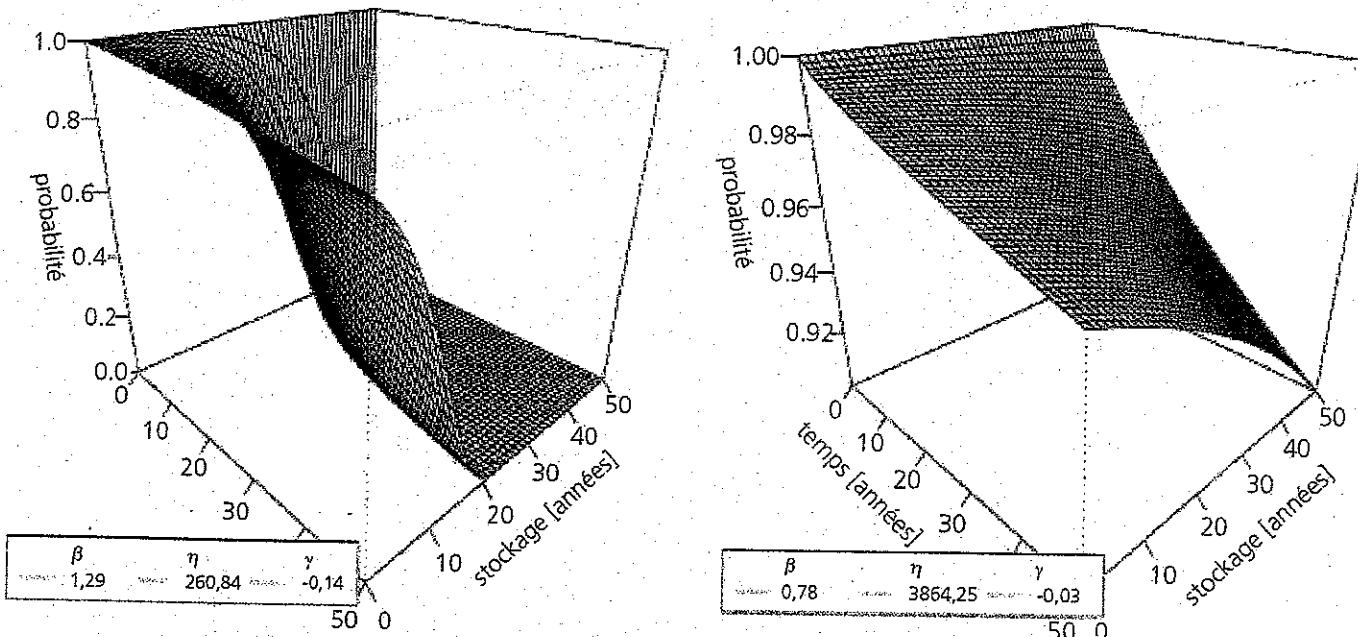


Fig. 14 a et b - Estimation de la fiabilité de constituants fonctionnellement équivalents en fonction de l'âge et de la durée de stockage

enfin, le temps de stockage avant l'installation.

Pour chaque constituant électronique, les facteurs d'influence les plus importants ont été déterminés. Nous constatons que la durée de stockage est un facteur primordial. Il peut avoir un effet sensiblement différent selon le constituant et sa technologie. Les figures 14a et b illustrent, pour deux produits fonctionnellement équivalents, des comportements différents au regard de la durée de stockage.

■ Modèle avec remplacements successifs

De même que pour la voie courante, il est nécessaire de tenir compte de l'effet des remplacements successifs. Un matériel défaillant est remplacé par un matériel neuf qui, à son tour, sera soumis à l'usure ou au vieillissement... On définit alors à partir de la loi de défaillance du composant la densité de renouvellement $h(t)$.

Le facteur de forme β étant généralement faible pour les composants de signalisation, le recouvrement entre remplacements successifs

conduit à une atténuation rapide des pics de remplacements.

■ Du modèle de défaillance au modèle de coût

De même que pour la voie courante, le coût d'entretien annuel se compose d'une part, d'un coût lié aux défaillances entraînant des remplacements de constituants et, d'autre part, d'un coût c_f fixe non directement lié aux remplacements de constituants.

Le coût d'entretien cumulé à la date T , le coût de régénération et le coût de maintenance se calculent alors comme décrit plus avant pour la voie courante.

Pour le calcul des coûts de maintenance, il est important de considérer toutes les actions de maintenance (la réparation, le remplacement et le réemploi). Il y a aussi des prix d'inspections et de maintenance commune.

Il est alors possible de comparer la stratégie de maintenance actuelle, qui est fondée sur la maintenance curative, à une nouvelle stratégie qui inclut le renouvellement périodique. Il est à noter que même si nous utilisons une stratégie de remplacement systéma-

tique, il y a toujours des constituants qui peuvent être défaillants entre les cycles de renouvellement. Ces coûts doivent aussi être considérés. Comme le constituant de signalisation est essentiel pour la sécurité globale du système ferroviaire, nous analysons toujours le nombre de défaillances attendues en plus des coûts induits.

■ Simulation : réseau existant

Pour les constituants de signalisation électroniques, il n'y avait généralement aucun renouvellement périodique systématique. Les constituants sont individuellement remplacés après défaillance. Dans ce cas-là, il est nécessaire de considérer les remplacements successifs avec la fonction $h(t)$ de chaque composant.

À titre d'exemple, pour quantifier l'impact du vieillissement sur les stratégies de maintenance nous avons utilisé trois scénarios :

- le premier scénario n'inclut pas de maintenance préventive. Les appareils sont donc remplacés lorsque survient une panne. Ils sont jetés si leur âge est jugé excessif et réparés sinon;
- le second scénario prévoit de remplacer un certain nombre d'appareils par an de façon préventive (10 % par

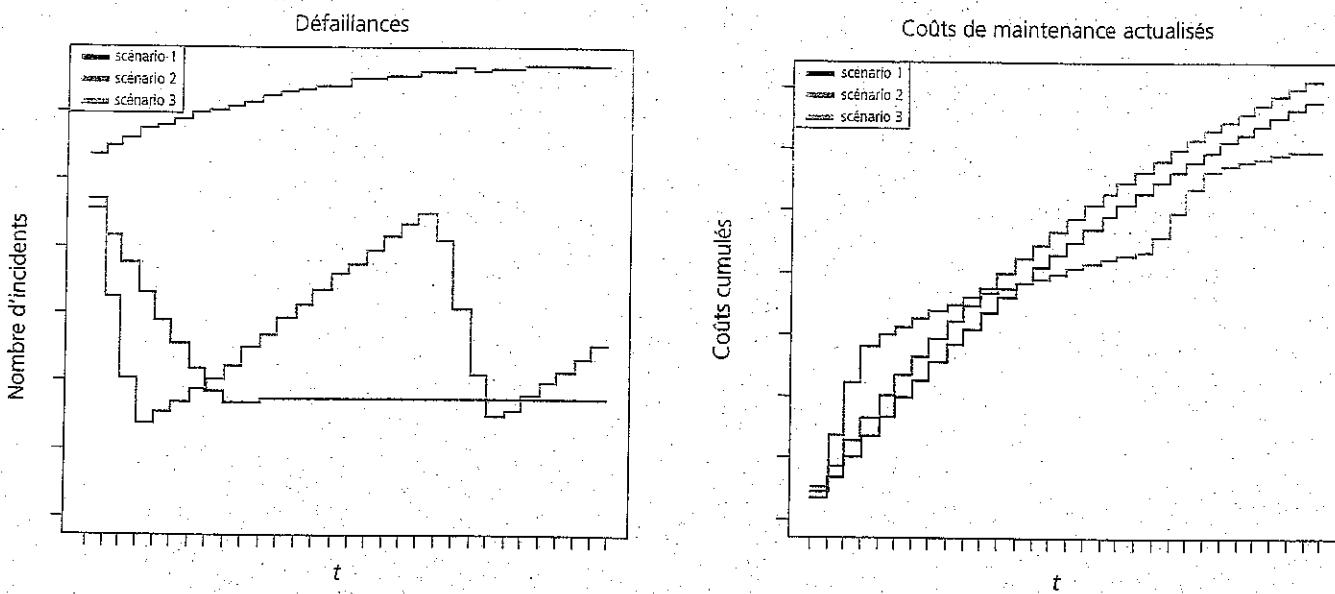


Fig. 15 a et b - Estimation du nombre de défaillance (incidents) et Prévisions de coûts cumulés actualisés pour les trois scénarios

exemple). Les appareils remplacés en priorité sont les appareils de deuxième vie et les appareils les plus anciens. Le nombre d'appareils à changer peut également être calculé selon un budget annuel fixe;

- le troisième scénario prévoit un remplacement cyclique des appareils selon l'âge du constituant (la maintenance conditionnée par le temps de fonctionnement). Les constituants défaillants sont remplacés et les constituants ayant fonctionné une durée fixée sont remplacés systématiquement et préventivement.

Comme pour le calcul de coûts pour des nouveaux constituants, nous évaluons économiquement chaque action de maintenance (la réparation, le remplacement et le réemploi). Il est alors possible de simuler l'impact des 3 stratégies de maintenance proposées sur le vieillissement du parc des constituants. Nous calculons le nombre attendu de défaillances, le nombre attendu de constituants à remplacer et l'évolution des coûts de maintenance au cours du temps. À partir de ces données, il est alors possible de trouver l'intervalle optimal de surveillance et le cas échéant de remplacement systématique.

Le résultat des simulations pour un matériel sur le réseau national est illustré par les figures 15a et b.

Il apparaît ainsi qu'un changement de la stratégie de maintenance n'augmente pas le nombre de défaillances. Le coût de maintenance (entretien et remplacements) correspondant au troisième scénario (rouge) est plus onéreux les premières années, mais ultérieurement les coûts cumulés deviennent inférieurs aux deux autres stratégies. Une stratégie de renouvellement préventif systématique de ces matériaux minimise ainsi les coûts cumulés sur l'ensemble des cycles de vie.

La prise en compte de ces nouveaux éléments en association avec les bases de réparation des ateliers SNCF a permis à l'Ingénierie SNCF :

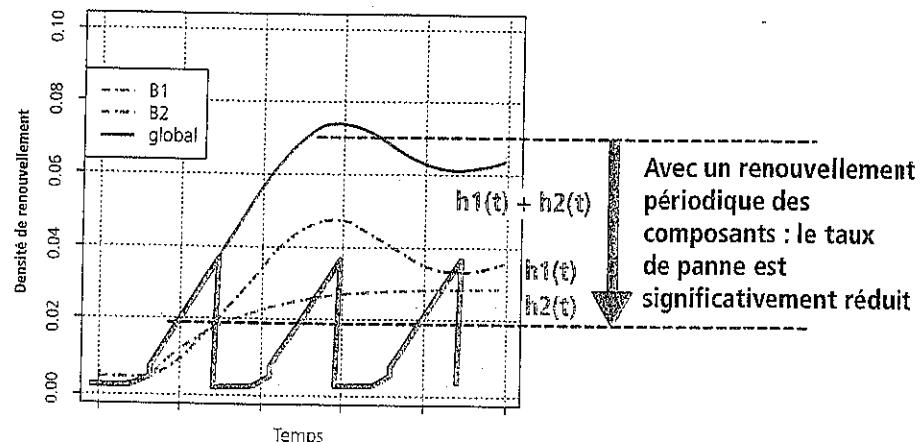


Fig. 16 - Densité de renouvellement $h(t)$ d'une fonction de signalisation

- d'affiner les analyses des causes intrinsèques de dégradation et/ou de défaillances;
- d'améliorer les méthodes de diagnostic et de réparation;
- de proposer aux industriels des améliorations possibles de leurs produits.

de matériaux vieillissants pour respecter un niveau donné de fiabilité cible.

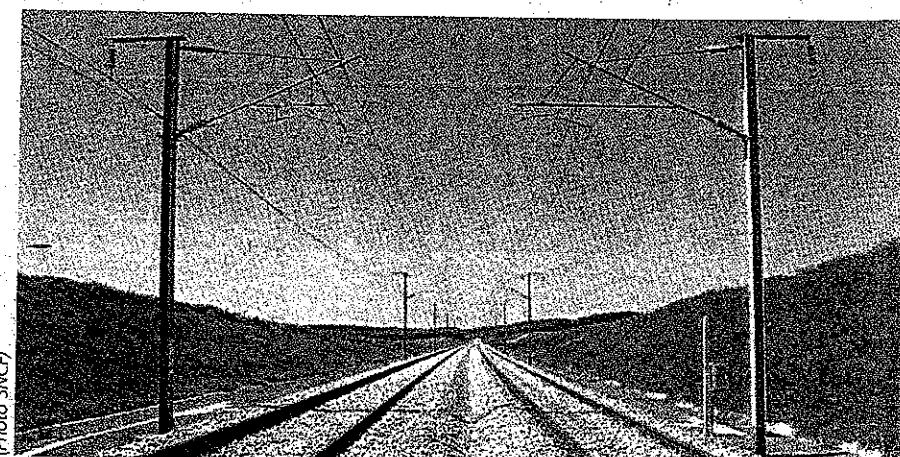
Conclusion

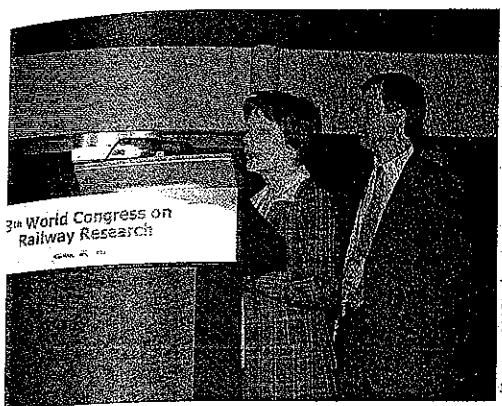
Sur la méthode

Cette démarche s'appuie sur des concepts habituellement utilisés dans d'autres domaines (sûreté de fonctionnement...). Elle permet de bien modéliser les phénomènes perçus intuitivement :

- plus on régénère une installation et moins l'entretien coûte cher et inversement;
- l'entretien seul ne permet pas de faire durer une installation indéfiniment car elle vieillit;
- il existe généralement un optimum économique entre entretien et régénération.

Tout modèle doit prendre en compte ce phénomène de vieillissement pour pouvoir approcher au mieux la réalité. Sur ce point, la méthode retenue a tenu compte des données accessibles. Le phénomène de vieillissement fait





(source WCRR)

Carolina Meier-Hirmer et Marc Antoni lors de leur présentation au WCRR08 à Séoul en mai 2008

actuellement l'objet de discussions et d'approfondissements.

■ Sur les conclusions provisoires

On peut retenir que pour la voie courante le maintien de la régénération à son niveau actuel conduira à un fort accroissement des dépenses d'entretien dans les années à venir. L'optimum économique est obtenu pour un niveau de régénération sensiblement plus élevé qu'actuellement. En effet, il devrait être d'un niveau deux fois supérieur au coût d'entretien.

Pour les composants de signalisation, les résultats obtenus permettent à l'ingénierie de maintenance SNCF d'adapter les directives, de proposer

des politiques de renouvellement préventif à RFF et ainsi d'estimer les futures dépenses de maintenance. L'expérience ainsi acquise permet, pour un usage et un objectif de régularité fixés, d'optimiser les politiques de maintenance et de soutien logistique (renouvellement, gestion des réparations, gestion des réaffectations, gestion des stocks, planification des commandes...).

■ Sur l'extension du champ d'investigation

L'ingénierie de maintenance SNCF tente d'étendre ce type d'approche à d'autres types d'installations :

- les appareils de voie ;
- les caténaires ;
- les ouvrages d'art...

Il est aussi envisagé d'utiliser ce type de modèle pour des lignes particulières afin de répondre à des questions telles que :

- Peut-on prédire l'évolution des défaillances sur une ligne donnée ?
- Comment moduler l'entretien en fonction de l'âge des composants d'une ligne ?

Enfin, en formalisant ainsi l'évolution de l'entretien en fonction de l'âge des éléments, il est envisageable d'éclairer des choix inter-techniques :

Références

- [1] Antoni, M. & Meier-Hirmer, C. 2008. *Economic correlation between maintenance and regeneration - optimisation of maintenance strategies for tracks, signalling equipment and overhead line components*. Dans les actes du WCRR 08.
- [2] Bertholon, H. 2001. *Une modélisation du vieillissement*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- [3] Bertholon, H., Bousquet, N. & Celeux, G. 2004. *Une modélisation de durée de vie à risques de défaillance concurrents*. Dans les actes des Journées de Statistique 36.
- [4] Lévi, D. 2003. *Régénération des voies : outils mathématiques et informatiques d'optimisation*. Revue Générale des Chemins de Fer, 9, 27-33.

« Peut-on améliorer la répartition des moyens consacrés à l'entretien des différentes techniques (voie, caténaires, signalisation) ? ».

La méthode proposée est générale. Le domaine d'application est très large. Tous les équipements d'infrastructure remplaçables peuvent être utilisés pour une telle étude. C'est un point qui a été remarqué lors de sa présentation au congrès WCRR08 à Séoul, lui permettant de recevoir le premier prix des contributions relatives à l'infrastructure [1], seul prix n'ayant pas été remis à un organisme de recherche. ■



Marc ANTONI

Chef du pôle Innovation Technologique (CSC ER IT) à la Direction de l'Infrastructure de la SNCF



Carolina MEIER-HIRMER

Expert Statistiques et REX,
Pôle Innovation Technologique à la Direction de l'Infrastructure de la SNCF

Les auteurs tiennent à remercier chaleureusement M. Frank Bernard, Directeur de la plaque Nord Paris, la Direction de l'Ingénierie et MM. Florent Lejeté et Nicolas Zilberman, élèves ingénieurs Supélec en stage au sein du pôle Innovation Technologique (CSC ER IT) notamment leurs importantes contributions dans la réalisation des travaux dont l'auteur était dans ce dossier.