JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE STATISTIQUE

JEAN-LOUIS BON

Optimisation de la maintenance : présentation

Journal de la société française de statistique, tome 141, n° 3 (2000), p. 3-8

<http://www.numdam.org/item?id=JSFS_2000__141_3_3_0>

© Société française de statistique, 2000, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Journal de la société française de statistique » (http://publications-sfds.math.cnrs.fr/index.php/J-SFdS) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (http://www.numdam.org/conditions). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
http://www.numdam.org/

OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE : PRÉSENTATION

Jean-Louis BON [1]

Ce numéro spécial du journal de la SFdS est consacré aux problèmes méthodologiques d'organisation de la maintenance de matériels industriels. L'idée d'un tel numéro est venue à la suite de la journée « Optimisation de la maintenance » qui s'est déroulée le 7 décembre 2000 à l'Institut Henri Poincaré à l'initiative du groupe Qualité-Fiabilité présidé par Zohra Cherfi de l'Université de Technologie de Compiègne.

Jérôme Collet (Direction Recherche et Développement d'EDF) et Michel Roussignol, (Université de Marne-la-Vallée) en assurèrent l'organisation et le programme scientifique. Une quarantaine de spécialistes y participaient, venus tant du milieu industriel que du milieu universitaire, la diversité des approches permettant de concilier l'analyse théorique des stratégies de maintenance et la nécessité de méthodes efficaces d'optimisation.

1. LA MAINTENANCE EST UNE NOTION DE BASE DE LA FIABILITÉ AU SENS LARGE

La *fiabilité* est un concept général qui traduit la capacité d'un système à réaliser la mission prévue sans tomber en panne pendant une durée donnée. Dans le langage courant, le terme peut recouvrir plusieurs notions différentes. Nous l'utilisons ici comme indicateur de la date aléatoire T de la panne. Plus précisément la ***fiabilité*** à la date t est la probabilité d'être encore en bon fonctionnement à la date t :

$$fiab(t) = Proba(T > t)$$

Lorsque le système est réparable, la date de panne ne suffit pas à décrire la qualité de fonctionnement du système. Après la première panne, le fonctionnement est interrompu pendant la durée des réparations. Le système est alors *indisponible*. Cette notion de disponibilité est importante pour l'utilisateur. Elle traduit le fait, par exemple, que la production est arrêtée, que la voiture ne peut démarrer, etc. Généralement, à long terme la disponibilité s'exprime sous la forme simple :

$$A = \frac{MUT}{MUT + MDT}$$

1. Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille, Université Lille1, 59655 Villeneuve d'Ascq CEDEX, jean louis.bon@eudil.fr

où *MUT* est le temps moyen entre la fin d'une réparation et la panne suivante (*Mean Up Time*) et *MDT* est le temps moyen d'une réparation (*Mean Down Time*). Si l'on veut calculer la disponibilité à court terme, les calculs se compliquent assez vite et le choix d'approximations pertinentes dans un cadre assez général est un problème qui nécessite de nouvelles recherches.

Une très grande fiabilité en soi n'est pas suffisante pour que le système soit disponible à chaque fois qu'il est sollicité. Une voiture fiable a de grandes chances de ne pas avoir de panne pendant longtemps mais si la réparation d'une panne est très longue (problème de pièces détachées par exemple) la voiture restera longtemps indisponible et le gain en fiabilité risque d'être perdu. Accroître la disponibilité est donc un enjeu important, en particulier pour des matériels de production où l'indisponibilité fait chuter la productivité.

Le terme « maintenance » est défini par la norme AFNOR NF X 60-000 de la façon suivante. « *La maintenance est l'ensemble des actions permettant de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé* ». Cette notion est liée aux coûts, à la productivité, à la qualité et à la fiabilité. On voit que les critères de choix sont multiples et contradictoires.

– réduire au maximum la durée de réparation en multipliant les équipes de maintenance,

– limiter au maximum le nombre de pannes en multipliant les redondances,

– réduire le risque de pannes en multipliant les inspections, etc.

Ces notions sont souvent synthétisées, en termes financiers, sous la forme de « coût global du produit ». Celui-ci inclut à la fois les coûts de production, les coûts de fonctionnement mais aussi les coûts de maintenance (et même les coûts d'arrêt d'exploitation). Ici la notion de coût est à prendre au sens large. Une baisse de production a un coût qu'il est possible d'évaluer.

2. LES STRATÉGIES DE MAINTENANCE

Suivant le domaine d'application, le type de matériel concerné, l'enjeu économique de la défaillance, différentes stratégies de maintenance peuvent être mises en place.

La **maintenance corrective** consiste à agir après une défaillance (c'est la notion habituelle de réparation). La **maintenance préventive**, au contraire, est faite pour réduire la probabilité de défaillance. C'est souvent une attitude de sagesse que de bien organiser la maintenance préventive. On distingue la *maintenance systématique et la maintenance conditionnelle.* La maintenance systématique consiste en une planification a priori des visites et des opérations. C'est l'habituelle révision tous les 10000 km de la voiture. On change systématiquement certaines pièces et on teste les autres. C'est parfois l'occasion d'appliquer des principes populaires de maintenance. *S'il n'est pas nécessaire de changer, il est nécessaire de ne pas changer.*

La **maintenance conditionnelle** se traduit par des inspections plus ou moins espacées suivant l'état du système. Il est raisonnable de visiter plus souvent une installation fragilisée par une première défaillance ou une installation ayant beaucoup fonctionné. Là encore, plusieurs stratégies viennent à l'esprit. On peut prendre en compte l'âge du matériel et on parlera de ***maintenance conditionnelle à l'âge***. Cet âge n'est pas nécessairement calendaire, il est souvent plus judicieux de prendre l'âge de fonctionnement mesuré depuis la dernière inspection. Mais on peut aussi se baser sur l'état observé lors d'une inspection. Il s'agit alors de ***maintenance conditionnelle à l'état***. On retrouvera ces notions dans la suite, en particulier dans les exposés de S. Bloch-Mercier et al. d'une part, de L. Dieulle et al. d'autre part.

Le rôle des inspections lui-même peut jouer de façon significative. Dans une stratégie à *réparation minimale*, on ne change que le bloc défaillant, le reste du système continuant à fonctionner avec les anciens composants. Le système est après intervention aussi bon qu'il était avant. Il faut alors tenir compte de propriétés de vieillissement de chacun des blocs de façon indépendante. Dans le même esprit, on peut considérer la stratégie de *réparation complète*. Le système est après intervention comme neuf.

Bien sûr, la stratégie de la maintenance et la qualité des opérations de maintenance ont des répercussions directes sur la production et sur les charges financières. Intuitivement, on peut dire que meilleure est la maintenance, moins fréquentes seront les pannes et moins élevés seront les coûts de réparations.

3. LES PROBLÈMES MATHÉMATIQUES ET STATISTIQUES ASSOCIÉS

Même si on se limite à la maintenance préventive, on constate qu'il y a un grand nombre de choix de politiques de maintenance. Rien que pour un composant d'un produit, on peut décider de le changer au bout d'un certain temps d'utilisation du composant ou du produit, au bout d'un certain nombre de pannes du produit, après la panne d'un autre élément, etc. Cette diversité explique le nombre considérable de modèles développés à la fin du siècle dernier (1970-2000). Les deux premiers ouvrages fondamentaux furent, à l'époque de la guerre froide, d'une part celui de Barlow R.E. et Proschan F. « *Mathematical Theory of Reliability* » et d'autre part celui de Gnedenko B.V, Belyaev Yu.K. et Solovyev A.D. « *Mathematical Methods in Reliability Theory* ». On y trouve les premiers résultats mathématiques d'optimisation de la maintenance préventive. Ces résultats s'appuient sur la théorie des processus stochastiques, en particulier la théorie du renouvellement, des processus de markov, semi-markov, etc. La théorie du renouvellement est l'exemple même de théorie mathématique qui s'est développée à partir des problèmes concrets de remplacement de machines. Ces théories étaient déjà bien développées à cette époque mais leur importance économique s'est accrue et l'optimisation de la maintenance de systèmes industriels est devenue une source supplémentaire de recherches en théorie des probabilités.

Étudier la maintenance préventive n'a de sens que si les résultats sont concrètement faciles à mettre en œuvre. Cela dépend souvent des données statistiques disponibles. Or, dans le domaine industriel, les données sont la plupart du temps incomplètes ou même fortement censurées. Il est alors indispensable de mettre au point de nouvelles techniques statistiques pour les estimations de durées de vie ou des paramètres d'un processus stochastique. Ces difficultés ouvrent le champ à de nombreuses recherches concernant l'estimation de paramètres, l'analyse bayésienne, l'estimation de taux de défaillance, dans des modèles à information complète ou incomplète, avec ou sans propriétés de vieillissement.

Récemment, les travaux dans ce domaine se sont multipliés, tant dans le secteur public des universités ou des grands organismes que dans le secteur Recherche et Développement du privé. La théorie mathématique de l'optimisation de la maintenance préventive est devenue un thème de recherche dans de nombreux laboratoires, non seulement dans des écoles d'ingénieurs mais aussi dans des universités. Il serait trop long de tous les citer, et nous prendrions le risque d'en oublier. On trouvera dans les actes du colloque *Mathematical Methods in Reliability MMMR'2000* de nombreuses contributions françaises dans les différents problèmes d'optimisation de la maintenance. Citons également les actes des journées de Fez de la Société Française de Statistique (mai 2000) où une session était dédiée à la maintenance de systèmes industriels. Pour des contributions plus centrées sur les aspects pratiques, il est possible aussi de consulter les actes de différents colloques *LambdaMu* organisé par l'ISdF, *Qualita* organisé par le Cnam, etc.

4. PRÉSENTATION DES CONTRIBUTIONS

Le tour d'horizon des problèmes d'optimisation de la maintenance que nous proposons ne peut se prétendre exhaustif. Il s'agit plutôt d'un circuit touristique au pays de la méthodologie de la maintenance. Quatre exposés donnent des exemples de recherches théoriques récentes et les trois autres sont centrés sur l'aspect pratique de l'optimisation.

Les deux premiers exposés sont le fruit des travaux de recherche du groupe de fiabilité de l'Université de Marne-la-Vallée (S. Bloch-Mercier, C. Cocozza-Thivent, M. Roussignol). Le premier décrit « **divers modèles stochastiques utilisés pour l'optimisation de la maintenance** ». Il s'agit de présenter un modèle de maintenance suffisamment général pour englober de nombreux modèles usuels. Le système possède plusieurs niveaux de dégradation et prend en compte à la fois la maintenance préventive (inspections régulières) et la maintenance corrective (réparations non nécessairement instantanées). Le processus de dégradation est supposé dans un premier temps markovien, mais une généralisation au cas semi-markovien est proposée. En particulier les auteurs donnent des résultats asymptotiques d'optimisation pour les deux grands types de maintenance conditionnelle vus plus haut : maintenance conditionnelle à l'âge et maintenance conditionnelle à l'état. Dans certains cas, il est possible de calculer ou d'optimiser la disponibilité asymptotique ou le

coût moyen asymptotique mais des exemples sont donnés pour lesquels ce problème reste ouvert. Le deuxième exposé intitulé « **Optimisation de la maintenance corrective d'un système réparable** » est dans le prolongement de cette présentation. Il s'agit de discuter l'opportunité d'un type de réparation en fonction des différents états d'un système. Comment le système doit-il redémarrer après la réparation ? Quels sont les composants prioritaires à réparer ? etc. De nombreux résultats récemment publiés dans la thèse de S. Bloch-Mercier sont donnés. Ils sont illustrés par des exemples numériques.

Le troisième exposé donne un résultat d'optimisation pour « **la disponibilité de systèmes subissant des tests périodiques** ». Quand on veut comparer des politiques de maintenance, on est conduit à comparer des variables aléatoires positives. C'est là qu'intervient la notion d'ordre stochastique utilisée dans d'autres domaines des probabilités. Pratiquement, se pose le problème de savoir si la modélisation par une loi exponentielle ou par toute autre loi raisonnable donne des résultats similaires. Il est montré, qu'à moyenne fixée, l'indisponibilité asymptotique est encadrée par les valeurs obtenues respectivement avec une loi de Dirac et celles obtenues avec une loi exponentielle. D'autres problèmes du même type sont abordés dans la thèse de J. Collet (EDF) à l'Université Paris-Sud.

Le quatrième exposé concerne les « **modèles à structure masquée utilisés en maintenance** ». La qualité de la maintenance dépend de la qualité des indicateurs de fiabilité. Ceux-ci reposent sur les données de retour d'expériences. Or, dans la pratique, de nombreuses difficultés sont rencontrées dans l'analyse de ces données. C'est donc un point de vue plus statistique. G. Celeux montre, à partir de deux exemples concrets, quelques problèmes de maintenance qui surviennent lorsque les données de retour d'expériences sont trop peu informatives. Les modèles associés (modèles à structure cachée) peuvent être estimés par les modèles EM. Une annexe permet de se familiariser avec la méthode EM qui repose sur une estimation par maximum de vraisemblance. Mais une approche bayésienne est possible pour ces modèles. Une comparaison entre les deux approches est donnée dans un cadre plus général de situations à structure cachée.

L'exposé de D. Jeannel (Snecma-moteurs) et I. Montagnier (Retec) est la présentation d'un cas pratique d'estimation d'un paramètre clef de la maintenance, ce qui conduit à l'**optimisation des intervalles inter-inspections de turboréacteurs civils**. Dès la phase avant-projet d'un futur moteur civil, on doit faire une prévision des coûts de maintenance. En aéronautique, il s'agit essentiellement d'un modèle de maintenance selon l'état, la fréquence des visites en atelier dépendant de la température de sortie de turbine. Bien sûr aucun retour d'expérience n'est possible pour ce nouveau matériel. Comment modéliser ce paramètre à partir des informations disponibles ? Comment combiner jugements d'experts et certains éléments statistiques connus des constructeurs ? C'est la connaissance de ces paramètres qui permettra de définir les temps de dépose de moteurs pour une flotte considérée.

L'exposé suivant est dû à une équipe du laboratoire de Modélisation et Sûreté des Systèmes de l'Université de Troyes composée de L. Dieulle, C. Bérenguer,

A. Grall. Il s'agit d'établir «**une politique de maintenance conditionnelle à temps continu pour un système qui se dégrade de manière aléatoire et continue**». Les inspections peuvent avoir lieu à n'importe quel instant et leur choix est fonction de l'état du système lors de l'inspection précédente. Elles permettent de connaître l'état exact du système aux dates de visites. Beaucoup d'inspections permettent certes un suivi efficace de la dégradation mais le coût en est élevé. Trop peu d'inspections ne permettent pas d'intervenir à temps pour empêcher la défaillance du système. Il s'agit d'une modélisation par un processus Gamma à temps continu et espace continu. Des techniques faisant appel aux processus régénératifs et semi-régénératifs sont utilisées pour évaluer un coût moyen sur un horizon fini et permettre de l'optimiser.

Le dernier exposé concerne l'«**analyse de fiabilité et de vieillissement d'une cage de développantes de l'alternateur principal d'une installation nucléaire**». Cet alternateur est une pièce critique à la fois pour la disponibilité de la tranche (et donc la production) mais aussi pour les coûts de maintenance qu'elle engendre. Les auteurs, T. Souchois, B. Villain et N. Richard, de la Direction Recherche et Développement d'Électricité de France, présentent d'abord le problème concret d'estimation de la durée de vie d'une cage de développantes sous l'effet de vibrations. Une démarche bayésienne est proposée pour valider ou améliorer la politique de maintenance actuelle. Un logiciel développé par EDF permet une estimation à partir de lois de Weibull usuelles pour les matériels avec usure.

5. POUR EN SAVOIR PLUS SUR LES ASPECTS MATHÉMATIQUES DE LA MAINTENANCE

Il serait illusoire de vouloir être exhaustif dans une bibliographie concernant les problèmes d'optimisation de la maintenance. Nous mentionnons quelques ouvrages qui peuvent rendre service au lecteur qui souhaite étudier le sujet ou qui veut, dans son entreprise, confronter les méthodes utilisées à d'autres modèles. Nous avons déjà cité les deux ouvrages de base et les comptes rendus de congrès où le lecteur trouvera une mine d'idées et de résultats.

ASHER H., FEINGOLD H., *Repairable Systems Reliability : Modeling, Inference, Misconceptions and their Causes*, M. Dekker (1984).

BARLOW R.E., PROSCHAN F., *Statistical Theory of Reliability and Life Testing : Probability Models*, Silver Spring (1975) où sa version initiale *Mathematical Theory of Reliability*, J. Wiley (1965).

GNEDENKO B.V., BELYAEV Yu.K. et SOLOVYEV A.D., *Mathematical Methods in Reliability Theory*, Academic Press (1969) (version russe originale 1965).

GERSTBAKH I., *Models of preventive maintenance*, North Holland (1977) ou sa version révisée qui vient de paraître : *Reliability Theory with application to preventive maintenance*, Springer (2000).