JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE STATISTIQUE

THIERRY SOUCHOIS
BENJAMIN VILLAIN
NICOLAS RICHARD

Analyse de la fiabilité et du vieillissement d'une cage de développantes de l'alternateur principal

Journal de la société française de statistique, tome 141, n° 3 (2000), p. 85-97

<http://www.numdam.org/item?id=JSFS_2000__141_3_85_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/

ANALYSE DE LA FIABILITÉ ET DU VIEILLISSEMENT D'UNE CAGE DE DÉVELOPPANTES DE L'ALTERNATEUR PRINCIPAL

Thierry SOUCHOIS *, Benjamin VILLAIN **,
Nicolas RICHARD*

RÉSUMÉ

La compétitivité d'Electricité de France est gagée essentiellement sur celle de son outil de production. Avec 58 tranches nucléaires en exploitation, Electricité de France se doit d'adapter la maintenance de ses équipements pour atteindre le meilleur compromis technico-économique, par l'obtention d'une meilleure sûreté et disponibilité du matériel et par la maîtrise des coûts de maintenance. Parmi les systèmes élémentaires d'une installation nucléaire, l'alternateur principal est considéré comme un matériel critique, d'une part pour la disponibilité de la tranche et d'autre part pour les coûts de maintenance. Cet article présente la démarche adoptée pour déterminer la fiabilité d'une cage de développantes d'alternateur, sous l'effet de dégradations d'origine vibratoire, à partir de l'outil SURVBAYES employant la démarche bayésienne dans le but de valider et/ou améliorer les tâches de maintenance actuelles Cette analyse permet de proposer une hiérarchisation des machines, à partir des indicateurs de fiabilité, dans le but d'aider à optimiser le choix de maintenance (consolidation ou rebobinage).

1. INTRODUCTION

Une analyse de la fiabilité des cages de développantes des alternateurs en service [1] s'avère intéressante pour permettre :

* Electricité de France Division Recherche et Développement - Département SDM - Groupe Fiabilité des Composants et Structures – 6 Quai Watier – 78401 CHATOU Cedex.
e-mail : Thierry Souchois@edf.fr

** Electricité de France Division Recherche et Développement - Département ME Groupe Génératrices et Qualification des Machines – 1 Avenue du Général de Gaulle – 92141 CLAMART Cedex

1. L'alternateur principal, entraîné à 1500 tr/mn par la turbine, a pour mission de transformer l'énergie mécanique de l'arbre de la turbine en énergie électrique, c'est une machine quadripolaire qui alimente le transformateur général sous une tension de 20 kV. Il est principalement composé d'un rotor et d'un stator, ce dernier lui même composé d'un enroulement fait de barres conductrices connectées à des bornes Il existe une cage de développantes à chaque extrémité du stator et c'est l'endroit où les barres rejoignent la boîte à bornes.

- d'une part de connaître la durée de vie d'une cage de développantes sous l'effet de dégradations d'origines vibratoires,
- d'autre part de faire le bon choix de maintenance en fonction de l'état de la machine à partir de la connaissance de la fiabilité pour un temps de mission fixé de chaque cage.

La démarche consiste à :

- sélectionner les données de retour d'expérience : il s'agit de s'intéresser à toutes les données « événementielles » concernant les cages de développantes côté turbine. Le type de données traitées s'inscrit dans le cadre des données dites de survie multi-censurées,
- réaliser une analyse descriptive des données : il s'agit de mettre en évidence certains phénomènes à partir de statistiques élémentaires,
- quantifier l'effet des tâches de maintenance réalisées. Un expert du matériel définit un taux de rajeunissement du matériel pour chaque réparation. Ce taux mesure en pourcentage l'amélioration obtenue,
- modéliser le comportement de la cage de développantes sous l'effet de dégradations d'origine vibratoire par une loi de fiabilité avec la prise en compte des données complètes (défaillances) et des données multiples (opérations de maintenance préventive). Cette étape consiste, avec l'outil SURVBAYES, à déterminer la fiabilité intrinsèque de la cage de développante en ajustant une loi de Weibull sur les données de survie et en tenant compte de l'efficacité des tâches de maintenance.
- modéliser la fiabilité spécifique : il s'agit de modéliser une courbe de fiabilité prévisionnelle pour chaque composant, pour des temps de mission fixés commençant à la fin de collecte, en tenant compte de son propre historique de maintenance.

2. DONNÉES DU MODÈLE

Les données de retour d'expérience correspondent aux données « événementielles » contenues dans une base réalisée en collaboration EDF-constructeur. Cette base constitue un système de connaissance de l'historique de maintenance et de l'état de chaque machine. Elle est principalement alimentée par les fiches contenant les caractéristiques de fonctionnement des tranches (types d'arrêts) et les fiches correspondant à l'ensemble des événements observés ou réalisés sur l'alternateur.

Dans notre cas, on s'intéresse à un échantillon de 27 alternateurs de même conception et l'étude porte sur tous les événements (anomalies et réparations) constatés sur le composant « calages crocodiles et leurs liaisons côté turbine » des cages de développantes.

On distingue deux types de caractéristiques des données de survie de ce composant :

- ***les données « complètes » :*** Elles correspondent à une défaillance. Dans le cas de la cage de développantes, il n'existe pas de défaillance due à l'effet de dégradations d'origine vibratoire. Aussi, on s'est intéressé à un type particulier de dégradations, dites « fortes », pour lesquelles il est nécessaire de réaliser une tâche de maintenance similaire à une action corrective. Il s'agit en général des données de dégradations concernant les décohésions de calages.

- ***Les données censurées :*** Elles correspondent aux matériels ayant survécu jusqu'à la date d'observation. Dans le cas de la cage de développantes, le délai exact d'occurrence de l'événement associé à la donnée de survie n'est pas observé alors que des informations partielles sur ce délai sont néanmoins disponibles. L'événement est constaté à un instant tel que le matériel n'est pas encore défaillant. C'est le cas des dates de fin d'observation et des dates correspondant à des opérations de maintenance préventive pour réparer des dégradations dites « faibles » de la cage de développantes.

Cette affectation des anomalies en deux classes, dégradation dite « forte » ou « faible », est réalisée par l'expert matériel par la lecture du commentaire correspondant à la dégradation et du commentaire correspondant à la réparation associée. Ces informations sont disponibles dans la base de données de retour d'expérience.

3. ANALYSE DESCRIPTIVE

Le nombre de dégradations constatées pour les cages de développantes de notre échantillon est le suivant :

- 40 dégradations dites « fortes » : (pour lesquelles il a été réalisé une action de maintenance corrective),

- 104 dégradations dites « faibles » (pour lesquelles il a été réalisé une action de maintenance préventive).

La figure 1 présente la répartitions des dégradations en fonction du temps de fonctionnement et on remarque que le nombre de dégradations dites « fortes » augmente après 80000 heures de fonctionnement. Ce phénomène peut être caractéristique d'un vieillissement du composant.

Concernant les révisions effectuées sur les machines, on en déduit le temps moyen séparant deux révisions avec sortie du rotor de l'ordre de 31000 heures.

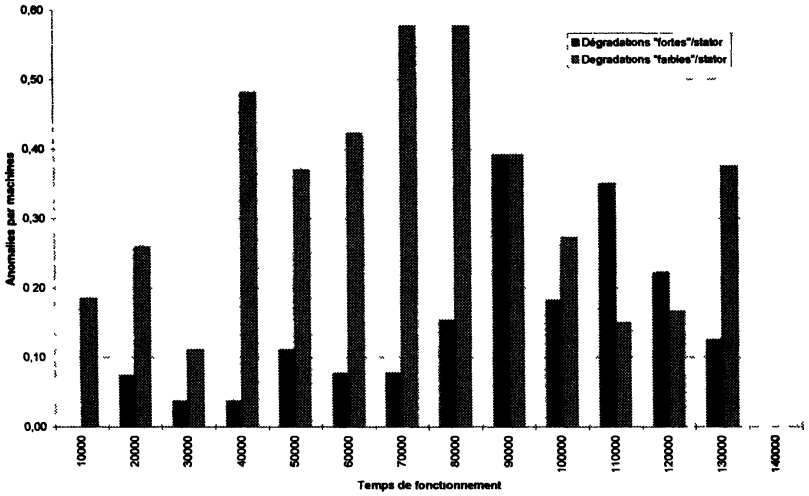

FIG 1. — Répartition des dégradations en fonction du temps de fonctionnement.

4. FIABILITÉ D'UN MATÉRIEL RÉPARABLE

4.1 Logiciel d'analyse bayésienne du vieillissement

Pour les composants réparables, la prise en compte de l'effet de la maintenance permet d'améliorer la modélisation de la probabilité de défaillance. Dans ce cas, les données de défaillances issues du retour d'expérience étant plus rares, il est nécessaire d'avoir recours aux techniques d'analyse statistique du vieillissement à partir de la démarche bayésienne. Le principal avantage de cette démarche consiste à enrichir le peu d'information « objective » des données de défaillances par la prise en compte de données « subjectives » à partir de l'interrogation d'experts.

Différents travaux ont été réalisés en ce sens par EDF [1]. Cette approche permet, par rapport à l'approche classique, de prendre en compte et de modéliser l'efficacité des tâches de maintenance afin d'obtenir la probabilité de défaillance intrinsèque sans effet de maintenance. L'ajustement est réalisé à l'aide du logiciel SURVBAYES version 1.1 [2] [3] utilisant la loi de Weibull.

Description du Logiciel SURVBAYES

Le logiciel SURVBAYES est un logiciel permettant aux fiabilistes de mettre en œuvre, de façon conviviale et performante, les techniques bayésiennes pour l'analyse de la fiabilité de matériels qui vieillissent et qui sont soit maintenus, soit non maintenus, c'est-à-dire subissant ou non des opérations de maintenance (réparation, remplacement, ...).

Ce type d'analyse permet d'aider les décisions concernant :

- l'évaluation de la durée de vie résiduelle de composants ou structures sensibles (pompes, vannes, tuyauteries, tubes de générateur de vapeur),

- la définition de stratégies d'extension de cette durée de vie,
- l'optimisation des programmes de maintenance préventive,
- la conception de nouvelles installations.

Si les données de survie issues du retour d'expérience ou d'essais de durée de vie sont rares, ce qui constitue une limite des analyses classiques, l'*Analyse de Fiabilité Bayésienne* peut être utilisée pour compenser ce manque d'information objective sur des matériels équivalents, en prenant en compte des informations subjectives issues du jugement d'experts.

Pour analyser par une approche bayésienne les composants ou structures qui vieillissent, c'est-à-dire pour lesquels, en l'absence de maintenance, la fréquence de défaillance augmente au cours du temps, des méthodes numériques performantes sont intégrées dans le logiciel SURVBAYES version 1.1.

Le logiciel SURVBAYES, capitalise le savoir-faire d'EDF et permet de mener, à partir de lois de fiabilité à deux paramètres (Weibull, gamma), les deux types d'analyse du vieillissement en fonctionnement suivants :

- qui l'analyse de composants *maintenus*, c'est-à-dire subissant des opérations de maintenance induisent un rajeunissement (réparation, remplacement...). Le modèle évalue la fiabilité « intrinsèque » des composants qui tombent en panne, suivant un modèle de *Weibull* à partir des données de survie, de jugements d'experts sur la durée de vie et de la prise en compte de l'effet de la maintenance.

- l'analyse de composants *non maintenus*, c'est-à-dire subissant des opérations de maintenance qui n'induisent pas de rajeunissement (contrôle non destructif, inspection visuelle,...). Le modèle détermine la fiabilité prédictive de composants qui tombent en panne selon un modèle de *Weibull* ou *Gamma*, en utilisant des données de survie rares et des jugements d'experts sur la durée de vie.

Le logiciel SURVBAYES a été développé en 1997 dans l'environnement UNIX et mis à niveau en 1999 puis actuellement en cours de portage sur PC/Windows avec la version 2. Il a été utilisé par EDF/SDM dans le cadre de plusieurs études : robinets, tubes de générateurs de vapeur, alternateurs, mécanismes de commande de grappe, sous-ensemble GMPP. Les techniques bayésiennes permettent de mélanger dans un formalisme mathématique rigoureux, des informations subjectives issues du jugement d'experts. Ce mélange est réalisé avec la possibilité de contrôler la cohérence des informations entre elles, de mener des études de sensibilité, de réactualiser avec des informations complémentaires.

Le modèle de Weibull

La méthode d'estimation utilisée est la méthode du maximum de vraisemblance. Les principales caractéristiques de la loi de Weibull sont rappelées ci-dessous. En fiabilité, c'est un modèle qui permet d'obtenir une grande gamme

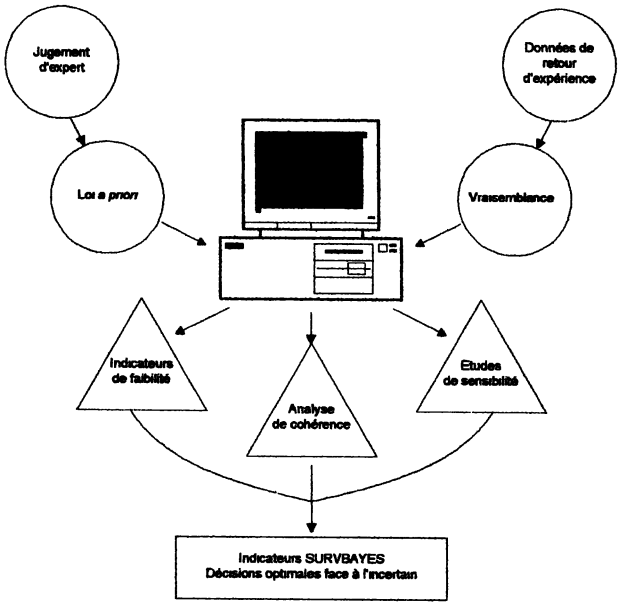

FIG 2. — Schéma de principe.

de formes de courbes et couvrir tous les cas de suivi d'un matériel : le rodage, la vie utile, le vieillissement. Les principales caractéristiques sont [4] :

Fonction de répartition

$$\overline{F}(x|\eta,\beta) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right)$$

Taux de défaillance

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

Le taux de défaillance est fonction du temps (de l'âge), η est le paramètre d'échelle et le paramètre de forme β permet de modéliser les trois phases de la période de vie du composant :

- $\beta < 1$, $\lambda(t)$ décroît : cela correspond à la période de rodage ;
- $\beta = 1$, $\lambda(t)$ est constant : indépendance vis-à-vis de t, on retrouve la loi exponentielle ;
- $\beta > 1$, $\lambda(t)$ croît : c'est la période de vieillissement.

Efficacité des tâches de maintenance

Les actions de maintenance posent des difficultés pour la modélisation de la fiabilité. Cependant, lorsqu'une tâche de maintenance est réalisée (corrective ou préventive), on peut faire l'hypothèse que le matériel est rajeuni et redémarre avec une fiabilité meilleure qu'auparavant.

Les observations pour un composant réparable permettent de construire un historique de maintenance à partir des données de retour d'expérience et de l'efficacité des tâches de maintenance.

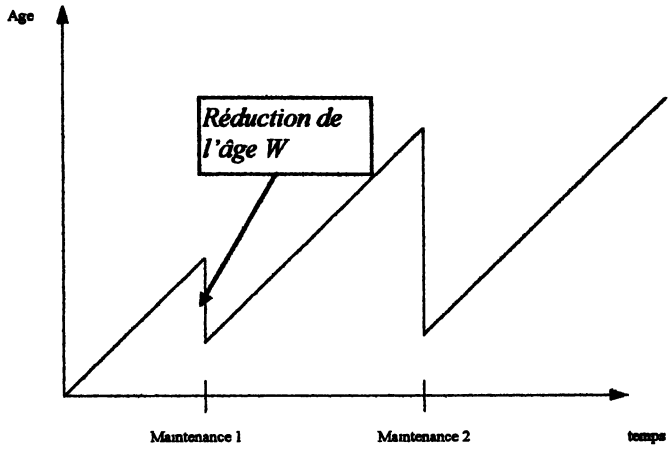

FIG 3. — Effet de la maintenance sur l'âge.

L'effet de la maintenance W est considéré comme une variable aléatoire caractérisant la réduction de l'âge à un temps donné de la vie du composant. L'efficacité de cette tâche est modélisée par une densité de probabilité $g\left(\frac{W}{\tau}\right)$ qui dépend du ratio entre la réduction d'âge et l'âge du composant avant l'opération de maintenance où $g\left(\frac{W}{\tau}\right)$ est la fonction de rajeunissement W à l'âge τ (sachant que le matériel est âgé de τ).

L'efficacité de maintenance peut être déterminée par la technique des diagrammes d'influence ou encore en interrogeant les experts matériels.

Dans l'étude de la cage de développantes, la quantification de l'efficacité de chaque tâche de maintenance a été réalisée par un expert de l'alternateur. Pour chaque anomalie constatée lors des actions de maintenance (réparations, révisions), il a affecté la dégradation à la classe faible ou forte et il a attribué un taux de rajeunissement compris entre 0 et 100 % en fonction de la réparation associée.

Les bornes de ce taux correspondent :

- ***dans le cas d'un taux à 0 % :*** à une tâche qui laisse le matériel dans l'état après intervention, aucun effet bénéfique sur l'ensemble de la cage de développantes (aussi mauvais que vieux),

- ***dans le cas d'un taux à 100 % :*** à une tâche qui remet à neuf l'ensemble de la cage de développantes (aussi bon que neuf).

Dans la réalité, le taux sera le plus souvent intermédiaire.

Le tableau 1 présente un exemple d'affectation de taux de rajeunissement pour trois anomalies.

TABLEAU 1. — Exemple d'anomalies et affectation de taux de rajeunissement

PV	Condition	Type	Modef 1	Modef 2	Commentaire	Raj.(%)	Dégradation (faible/forte)
PV2510	**RD**	**AR**	**DEG**		**Manque de cohésion entre crocos et segments CT.**	15	forte
PV2510	RD	RP			Nettoyage au SE, resserrage des crocos en agissant sur écrou tige inox CT		
PV6019	**RM**	**AR**	**FIS**	**DEG**	**Manque de cohésion entre segments et crocos à 1h-2h-3h-4h-10h et 11h ; fines fissures des vernis et cambouis.**	40	forte
PV6019	RM	RP			Affouillage des zones défectueuses, nettoyage au SE, resserrage crocos, pose d'araldite Liaison segments croco à 1h 2h 3h 4h 10h 11h		
PV6015 RFI93	**R**	**AR**	**CAM**	**DEG**	**Formation de cambouis et fissures de l'araldite entre crocos et segments sur tetes CT à 3h-5h-8h-9h-10h-11h.**	20	faible
PV6015 RFI93	R	RP			Nettoyage au solvant 26F, affouillage des fissures entre crocos segment sur tetes CT à 3 5 8 9 10 11h, pose araldite saine, peinture R4 et S2		

RD = Révision décennale, AR = Anomalie en révision, FIS = Fissure,
RM = Révision majeure, RP = Réparation, CAM = Pollution au cambouis
R = Révision mineure, DEG = Dégradation Calage,

Les observations en caractères gras correspondent aux anomalies et les observations en italique correspondent aux réparations associées.

Pour chaque anomalie, l'expert matériel indique dans les deux dernières colonnes : le type de dégradation (forte ou faible) et le taux de rajeunissement (valeur comprise entre 0 et 100 %).

4.2 Fiabilité intrinsèque générique d'une cage de développantes

La figure 4 présente la fiabilité intrinsèque de la cage de développantes sans effet de maintenance, c'est-à-dire la fiabilité d'un composant considéré neuf sans action de maintenance.

Cette courbe est tracée pour différents temps de mission de 1 à 10 ans.

Le tableau 2 présente les paramètres estimés de la loi.

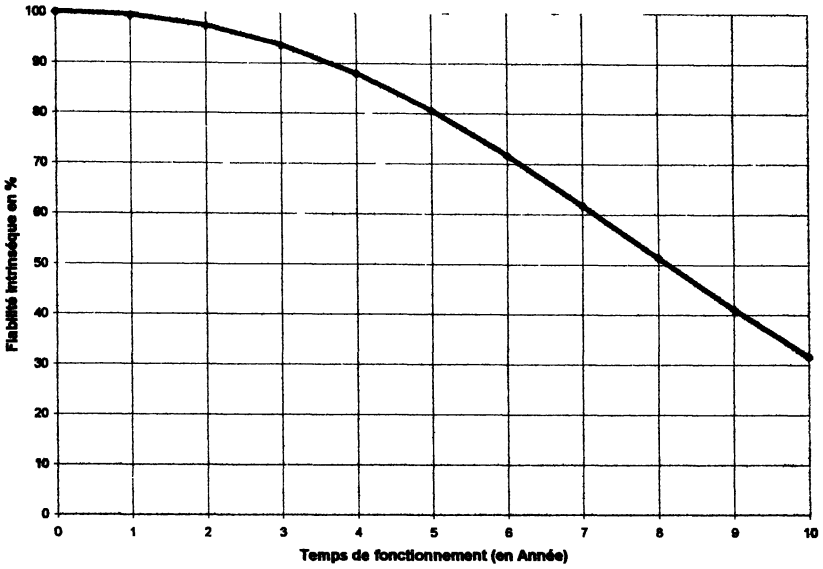

FIG 4. — Fiabilité intrinsèque générique de la cage de développantes

TABLEAU 2. — Valeur des estimations des paramètres du modèle

	E(β)	Var(β)	Var(η) (en heures)	E(η) (en heures)	MTBF (en heures)
Paramètre de la loi	2,47	0,16	82581	1508	73248

La durée moyenne entre deux défaillances (MTBF) est estimée à 73248 h soit environ 7 à 8 cycles de fonctionnement. Cette valeur correspond à l'espérance mathématique aléatoire T déterminée dans le cas de la loi de Weibull par :

$$E(T) = \text{MTBF} = \eta\Gamma(1 + 1/\beta)$$

Elle caractérise la durée moyenne d'apparition d'une dégradation dite « forte » pour un matériel neuf sans maintenance.

$\beta > 2$ indique un fort vieillissement fiabiliste en l'absence de maintenance.

Remarque :

Ce résultat est comparable aux observations faites à partir du retour d'expérience où l'on constate une augmentation des dégradations dites « fortes » au delà de 80000 heures de fonctionnement malgré les tâches de maintenance.

4.3 Fiabilité spécifique des composants

En fonction du retour d'expérience de chaque cage de développante, il est possible de modéliser une courbe de fiabilité prévisionnelle pour chaque composant, pour des temps de mission fixés commençant à la fin de collecte, en tenant compte de son propre historique de maintenance. Cette étude a nécessité l'évolution des possibilités de SURVBAYES en développant un nouvel algorithme.

4.3.1 Contexte

Il s'agissait d'ajouter une fonctionnalité dans l'algorithme afin de pouvoir, dans le cas d'un matériel maintenu, évaluer sa fiabilité prévisionnelle à un temps de mission, en tenant compte à la fois de la fiabilité intrinsèque des matériels supposés équivalents et de leur historique de maintenance spécifique.

L'évaluation de la **fiabilité spécifique** est réalisée pour un temps de mission correspondant au temps de fin d'observation pour le matériel augmenté des différents temps de mission choisis.

4.3.2 Description

La modification par rapport à l'algorithme existant est la suivante : on évalue la densité a posteriori sur les θ, η et τ : $P(\theta, \eta \text{ et } \tau | H_1, \ldots, H_{n-1}, H_{\text{spec}})$ qu'on stocke. Cette densité représente la connaissance sur les trois paramètres (η, θ, τ) dont l'âge τ du matériel spécifique correspondant à son temps de fin d'observation.

Le calcul de la fiabilité est quant à lui spécifique :

$$R(t_m) = \iiint e^{-\int_0^{t_m} \lambda(\eta,\theta,\tau+x)dx} \cdot \Pi(\eta, \theta, \tau | H_1, \ldots, H_{\text{spec}}) \, d\eta \, d\theta \, d\tau.$$

Le zéro au niveau de la borne inférieure d'intégration de l'exposant correspond à l'âge du matériel spécifique à Tfo, le temps de fin d'observation.

4.3.3 Fiabilité spécifique des cages de développantes

La modélisation de la fiabilité spécifique de chaque cage de développantes tient compte de l'hypothèse suivante :

- le temps t_0 correspond au temps de fin de collecte du retour d'expérience,
- toutes les machines sont en état de fonctionnement (donc «en vie») à cet instant t_0, la fiabilité est donc égale à 1 à t_0,
- le comportement de fonctionnement est identique, quelle que soit la tranche.

La figure 5 représente la fiabilité spécifique de chaque cage de développante pour chaque tranche en service à partir du temps t_0.

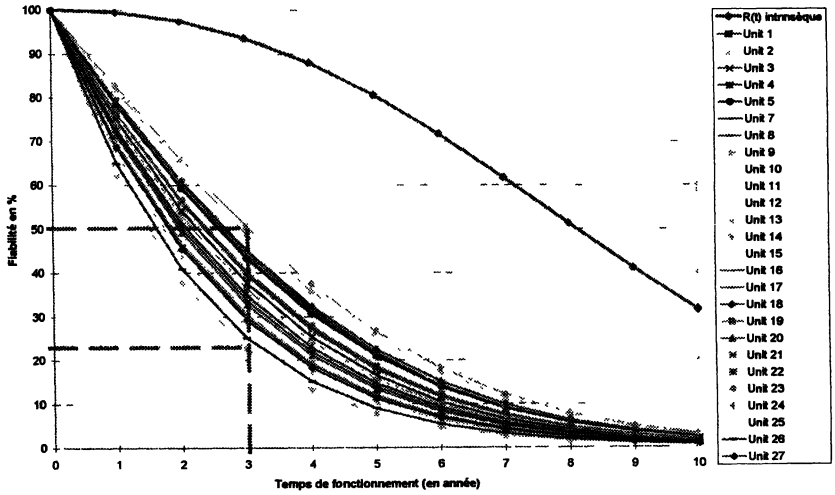

FIG 5. — Fiabilité spécifique de la cage de développantes de chaque alternateur

A partir de cette figure, il est possible de déterminer une hiérarchisation des machines à partir de leur fiabilité pour un temps de mission prévu et ainsi de valider et/ou améliorer les tâches de maintenance prévues pour le composant. Par exemple, on remarque qu'au bout de trois ans de fonctionnement, la fiabilité de la cage de la tranche « Unit 23 » est de 50 % alors qu'elle est seulement de 22 % pour la cage de la tranche « Unit 9 ».

Remarque :

Les cages de développantes ayant dans leur historique peu de dégradations fortes, et donc peu de tâches de maintenance corrective, sont celles qui possèdent la fiabilité la plus faible.

En effet, ce sont celles qui ont la probabilité la plus forte de dégradation, car elles possèdent :

- un temps de fonctionnement élevé sans défaillance,
- pas de maintenance corrective ayant pour effet de rajeunir le composant.

A l'opposé, on retrouve les cages qui ont eu un grand nombre de dégradations fortes et donc des tâches de maintenance correctives associées permettant de rajeunir le matériel et de faire reculer la probabilité de défaillance.

5. CONCLUSION

Optimiser la maintenance c'est éviter les indisponibilités des alternateurs tout en recherchant les coûts d'exploitation et de maintenance les plus réduits possibles ce qui est un objectif important pour EDF.

Cette démarche pour déterminer la fiabilité et valider ou améliorer les tâches de maintenance actuelles consiste :

- à utiliser le retour d'expérience du composant, en mettant en avant par une approche descriptive les principaux constats du comportement du composant,
- à réaliser une étude de fiabilité permettant de déterminer la probabilité de défaillance du composant en tenant compte des données censurées,
- à prendre en compte les opinions d'experts pour l'amélioration des modèles de fiabilité en tenant compte de l'efficacité des tâches de maintenance par l'approche bayésienne à partir de l'outil SURVBAYES,
- à déterminer la fiabilité spécifique de chaque machine du parc en tenant compte de son historique (présence d'anomalies et maintenances) depuis sa mise en service.

Ainsi, il est possible d'évaluer le risque probable de défaillance d'un composant de manière à anticiper les conséquences économiques.

Dans le cas de matériel tel que la cage de développante de l'alternateur, les résultats de valeurs de fiabilité spécifique permettent de hiérarchiser les composants par leur niveau de fiabilité pour différents temps de mission. A terme, il est envisagé d'associer aux indicateurs de fiabilité spécifique des données de contrôles propres à chaque machine (telles que les données de contrôle de niveaux vibratoires) pour mieux différencier les composants à risques, c'est-à-dire les composants pour lesquels le comportement de fonctionnement est atypique et la probabilité de dégradation la plus forte.

Pour plus d'information, on pourra contacter le chef de groupe fiabilité des composants et structures d'EDF R&D qui gère la continuité de l'activité présentée : Serge.hugonnard@edf.fr.

BIBLIOGRAPHIE

[1] VILLAIN B., PITNER P., PROCACCIA H. (1996), Probabilistic approaches to life prediction of nuclear plant structural components, Proceedings of the 1996 ASME PVP Conference, Montreal (CA).

[2] SOUCHOIS T., VILLAIN B. (1998), SURVBAYES : a software for bayesian reliability analysis of nuclear plant components subjected to aging, Proceedings of the l'ESREL'98 Conference, Trondheim(N).

[3] SOUCHOIS T., PERRIN S. (1998), Analyse des données de retour d'expérience et étude de la fiabilité pour l'aide à la stratégie de maintenance de l'alternateur principal, Communication affichée au 11ème Colloque de Fiabilité et Maintenabilité Lambda mu, Arcachon.

[4] LANNOY A. (1995), Analyse quantitative et utilité du retour d'expérience pour la maintenance des matériels et la sécurité, Eyrolles.