

J3eA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes,
Volume 4, Hors-Série 4, 10 (2005)
DOI : <http://dx.doi.org/10.1051/bib-j3ea:2005860>
© EDP Sciences, 2005

**La prise en compte de l'aspect FDMS dans le domaine des sous-stations de traction
électrique à la SNCF**

L. Alain

COMMUNICATION DANS LES JOURNEES DU CLUB EEA

« Diagnostic en Electronique, Electrotechnique et Automatique »

17-18 Mars 2005 Lyon

Titre:

**LA PRISE EN COMPTE DE L'ASPECT FDMS DANS LE DOMAINE DES
SOUS-STATIONS DE TRACTION ÉLECTRIQUE A LA SNCF**

Auteur : Lionel ALAIN

La traction électrique est très étroitement liée aux notions de réseaux de distribution de l'énergie électrique, de maintenance et de recherche de la continuité de service. Ce dernier aspect est d'autant plus important qu'il contribue directement à la régularité des circulations des trains électriques. La Direction de l'Ingénierie ainsi que les établissements SNCF en charge de l'Equipement d'Alimentation des Lignes Electrifiées ont pour mission d'assurer une disponibilité de l'alimentation de la traction électrique élevée ; les premiers lors les phases de conception et de régénération des sous-stations et postes, les seconds au cours des opérations de maintenance.

L'anticipation de tout arrêt intempestif est certes assurée au mieux par des systèmes et méthodes dédiés de surveillances et de diagnostic tels que les dispositifs de protections, perturbographies, techniques de maintenance préventive et autres mesures télétransmises au Centraux Sous-Stations. Cependant, la limitation des dysfonctionnements, et donc du nombre de systèmes de diagnostics à déployer par la suite, commence également dès la phase de conception. C'est ce point de vue orienté Ingénierie de conception qui est plus particulièrement développé ici. Le présent article reprend en effet les traits marquants de la FDMS prévisionnelle telle qu'elle est aujourd'hui appliquée aux sous-stations de traction électrique à la SNCF durant la phase de conception.

1. Les principaux enjeux de la FDMS prévisionnelle appliquée aux sous-stations de traction électrique :

En matière de sous-stations de traction électrique à la SNCF, qu'il s'agisse d'installations existantes ou neuves et quel que soit le niveau de tension considéré (1500Vcc, 25kVca ou 2x25kVca pour ne citer que les plus répandus en France) la finalité de l'étude FDMS consiste en général à :

- Optimiser des architectures et des modes de fonctionnement vis à vis d'une mission d'alimentation électrique en évaluant essentiellement l'apport de redondances de matériels ou de fonctionnalités à l'aide d'indicateurs de sûreté de fonctionnement,
- Vérifier le caractère GAME (Globalement Au Moins Equivalent) lors d'opérations de modernisation ou de diversification du parc de matériel

(remplacement par exemple d'une commande électro-mécanique par une commande électronique pour un interrupteur 25 kV),

- Mieux apprécier les offres et solutions techniques des constructeurs et aider à l'élaboration des spécifications techniques et des cahiers des charges fonctionnels aussi bien pour le matériel électrotechnique que pour les systèmes de contrôle commande.

La principale originalité tient dans le fait que les sous-stations de traction électrique par leur mission d'alimentation et le haut niveau de disponibilité requis imposent à l'étude FDMS **d'intégrer la modélisation d'un système maintenu**. En effet, dès que la sous-station est en service, il n'est pas question contrairement à une carte électronique de la laisser tomber en panne pour se constituer un retour d'expérience sur les indicateurs de sûreté de fonctionnements classiques (ou encore **indicateurs de sûreté de fonctionnement intrinsèques**). On recourt aux **indicateurs de sûreté de fonctionnement opérationnels** qui permettent de tenir compte des contraintes d'exploitation propres au système et de la maintenance préventive effectuée sur les installations. La définition et la mise en œuvre de ces indicateurs opérationnels sont deux des enjeux de cet article.

2. L'approche FDMS classique :

2.1 Quelques mots sur les indicateurs de FDMS intrinsèques classiques :

Pour mémoire on rappelle ci-dessous les définitions des indicateurs de sûreté de fonctionnement intrinsèques que sont la disponibilité, le **MTBF** (Mean Time Between Failure) et le **MTTR** (Mean Time To Repair). C'est en effet sur ces indicateurs que repose une étude FDMS et il est de plus en plus courant qu'une électrification est assignée à un objectif de disponibilité.

- La disponibilité caractérise l'aptitude d'un système à être en état d'accomplir une fonction requise, dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps déterminé, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs soit assurée. La disponibilité intrinsèque est exprimée numériquement à l'aide de la formule :

$$A = \frac{MTBF}{(MTBF + MTTR)} \times 100 \quad [1]$$

Il convient donc de définir les MTBF et MTTR utilisés, ce qui est effectué dans les deux points suivants.

- L'objectif de la fiabilité est de caractériser l'aptitude d'un système à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps déterminé. Une mesure pratique de la fiabilité est le MTBF (Mean Time Between Failure) qui est la durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée. Pour en obtenir une valeur, on peut recourir au taux de défaillance λ . Ce taux est le rapport entre le nombre de pannes pendant le cycle de vie du composant et le temps de fonctionnement cumulé correspondant. Si λ est supposé constant dans le temps (ce qui peut en général être considéré comme vrai sur la durée de vie de la plupart des composants), la répartition des

défaillances en fonction du temps est exponentielle. Dans ce cas, le MTBF s'exprime numériquement à l'aide de la formule : $MTBF = 1 / \lambda$.

- Le MTTR (Mean Time To Repair) est le temps de dépannage total mesuré pour un groupe d'unités divisé par le nombre total de défaillances. Ce critère quantifie la maintenabilité d'un système. Il est l'addition des composantes suivantes :
 - le temps administratif : période de temps entre la détection d'une panne et la notification au service de maintenance,
 - le temps de transport : période de temps entre la notification au service de maintenance et l'arrivée sur place du personnel de maintenance muni du matériel nécessaire,
 - le temps moyen de réparation (MRT (Mean Repairing Time))

2.2 L'étude FDMS classique :

En suivant cette démarche, le calcul des paramètres de FDMS d'un composant ou d'une installation dépend fortement de sa composition (nombre d'éléments et paramètres de FDMS de ceux-ci) et de son mode d'utilisation (type d'association fonctionnelle). Il semble donc satisfaisant de procéder en 2 temps :

Phase 1 : collecte d'informations

Le calcul débute par une collecte d'informations :

- ✓ répertorier le matériel,
- ✓ collecter les paramètres de FDMS des différents constituants de l'installation,
- ✓ connaître les conditions d'exploitation,
- ✓ répertorier les consignes de maintenance.

Phase 2 : calcul

Le cheminement de ce calcul est le suivant :

- ✓ assurer un découpage fonctionnel pour décomposer l'installation en groupements de matériel ou cellules,
- ✓ déterminer le type d'association fonctionnelle entre groupements et à l'intérieur des groupements,
- ✓ déterminer le type de redondance (active ou passive) en fonction des conditions d'exploitation,
- ✓ déduire, du type d'association fonctionnelle et des redondances éventuelles, l'équation d'état décrivant la fiabilité de l'installation à l'aide d'opérateurs logiques,
- ✓ calculer les paramètres de FDMS de chaque cellule puis de l'installation ce que permettent les logiciels de sûreté de fonctionnement.

L'ensemble de la démarche classique peut alors être résumée au travers du diagramme ci-dessous:

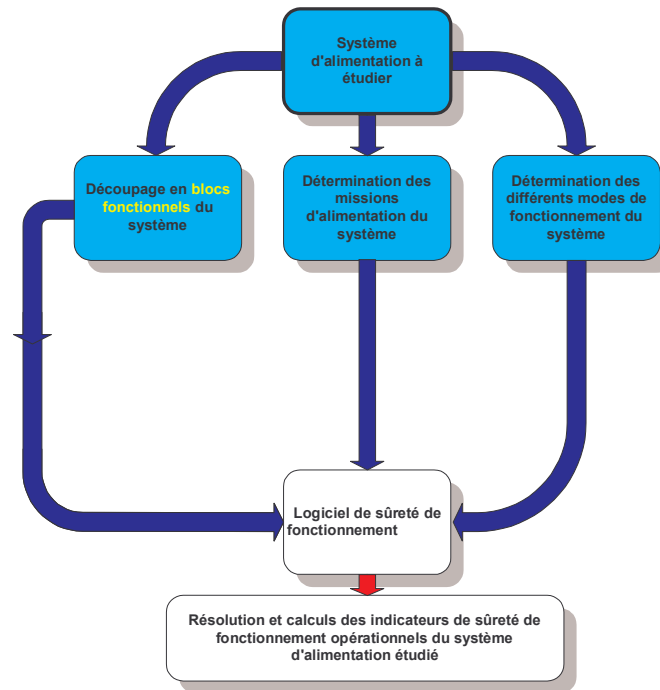


figure 1 : méthode d'approche FDMS classique

2.3 Les limites de l'approche FDMS classique :

Cette méthode est satisfaisante sur le plan théorique mais, en pratique, les données d'entrées issues du REX et des informations constructeurs ne sont pas forcément disponibles par bloc fonctionnel et ne sont pas les indicateurs de sûreté de fonctionnement intrinsèques tels que les MTBF et MTTR si bien que le diagramme précédent n'est pas adaptable directement.

Pour être réellement représentatifs des éléments qui composent le système, les paramètres FDMS collectés doivent tenir compte des contraintes inhérentes auxquelles le système étudié et les éléments le composant sont soumis à savoir :

- Les différents modes de fonctionnement
- Les contraintes de sollicitation du matériel
Dans le calcul, nous devons par exemple prendre en compte le niveau de sollicitation du matériel pour apprécier plus finement les critères de FDMS du matériel. En effet, selon sa place et sa mission dans l'installation, un même matériel peut présenter des contraintes de sollicitations différentes.
- Les contraintes introduites par la politique de maintenance
Le choix du type de maintenance, préventive ou corrective, conditionne en effet la fiabilité. Si la maintenance est corrective, la fiabilité prise en compte sera égale à celle annoncée par le constructeur. En revanche, si la maintenance est préventive, l'entretien régulier du matériel va permettre d'allonger sa durée de fonctionnement sans interruption de service et modifier sa fiabilité qui va tendre à augmenter. Notons, par ailleurs, que la maintenance corrective va occasionner

des interruptions de service forcées tandis que la maintenance préventive va générer en plus des interruptions de service planifiées.

- Les contraintes introduites par les conditions d'exploitation
- Les contraintes dues à l'automatisme de l'installation
Au travers de ces deux derniers points, d'identifier les contraintes qui vont influencer la disponibilité de l'installation. On cherche ainsi à mettre en évidence les redondances éventuelles et les éléments vitaux.
- Les difficultés à obtenir de la part des constructeurs des valeurs d'indicateurs de sûreté de fonctionnement cohérents pour effectuer des calculs de FDMS prévisionnels.

La prise en compte de ces contraintes conduit à l'élaboration d'indicateurs de sûreté de fonctionnement dits opérationnels.

Certains constructeurs nous ont confié les paramètres de FDMS de leurs appareils. Cependant, en l'absence d'une base de données complète sur ceux-ci, il est nécessaire de se tourner vers les données issues de notre retour d'expérience (REX). Ces données, sont disponibles auprès du service Maintenance et Développement SNCF sous diverses formes et sont fournies par « lot de maintenance ». Un lot de maintenance est un ensemble d'appareils ou groupements d'appareils qui pour des raisons d'exploitation et de sécurité subissent les interventions de maintenance préventive périodique au même moment. Ces données tiennent compte de l'ensemble des contraintes évoquées ci-dessus. Il est à noter qu'étant issues du REX sur l'ensemble du parc de sous-stations exploitées par la SNCF, ces données rendent également compte du diagnostic pratiqué quotidiennement par les équipes de maintenance.

3. L'approche FDMS opérationnelle appliquée aux sous-stations de traction électrique

3.1 Position du problème :

Le problème se réduit maintenant à traduire les indicateurs de sûreté de fonctionnement caractérisant un système maintenu afin qu'ils puissent permettre la modélisation du système par le logiciel de sûreté de fonctionnement. Ce qui se ramène dans notre cas à deux étapes :

- Fournir au logiciel des indicateurs de sûreté de fonctionnement de type MTBF et MTTR qui soient non plus des indicateurs intrinsèques mais opérationnels (car prenant en compte le REX et la maintenance).
- Fournir au logiciel un découpage fonctionnel du système à évaluer en fonction du découpage effectué par le département maintenance en lots de maintenances ainsi que des modes de fonctionnement souhaités.

Afin de profiter du retour d'expérience de la SNCF il est nécessaire d'intégrer la maintenance préventive pratiquée sur les installations car toutes les valeurs disponibles par retour d'expérience en tiennent compte.

3.2 L'élaboration des indicateurs de sûreté de fonctionnement opérationnels

Une des normes la plus éloquente à ce sujet est certainement la norme MIL-STD-1388-2B. Il importe de signaler ici que l'on se réfère à cette norme seulement pour la définition des **indicateurs de sûreté de fonctionnement opérationnels** dont il est ici question.

L'Annexe E section 3 article 001 de la norme MIL-STD-1388-2B nous renseigne doublement à ce sujet en permettant d'une part de définir précisément les indicateurs de sûreté de fonctionnement précédents et d'autre part d'en calculer les valeurs à partir des données d'entrées disponibles.

Le **MTBPM** (Mean Time Between Preventive Maintenance) est la durée moyenne entre deux actions de maintenance préventive sur le système.

Le **MTPM** (Mean Time of Preventive Maintenance) est la durée moyenne d'une action de maintenance préventive sur le système.

Ainsi, le **MTBM** (Mean Time Between Maintenance) (ou MTBMA (Mean Time Between Maintenance Actions) est la durée moyenne entre actions ou ensemble d'actions nécessaires pour réparer ou maintenir un système afin qu'il accomplisse une fonction requise dans des conditions données pendant un intervalle de temps donné. (Dans le cas présent, on se restreint à considérer les actions de réparation du système maintenu et les actions de maintenance préventive). Il s'exprime ici par :

$$MTBM = \frac{1}{MTBF} + \frac{1}{MTBPM} \quad [2]$$

Le **MAMDT** (Mean Active Maintenance DownTime) ou M est la durée moyenne d'une action ou d'un ensemble d'actions destinées à réparer ou à maintenir le système afin qu'il accomplisse une fonction requise dans des conditions données pendant un intervalle de temps donné. (Dans le cas présent, on se restreint à considérer les actions de réparation du système maintenu et les actions de maintenance préventive). Il s'exprime ici par :

$$M = MAMDT = \frac{ET_1 \times TF_1 + ET_2 \times TF_2}{TF_1 + TF_2} \quad [3]$$

Avec :

- ET_1 durée moyenne de réparation du bloc fonctionnel maintenu
- ET_2 durée moyenne d'une intervention de maintenance préventive sur le bloc fonctionnel maintenu
- TF_1 taux de défaillance du bloc fonctionnel maintenu
- TF_2 fréquence des opérations de maintenance préventive sur le bloc fonctionnel ce qui se traduit dans le cas présent par :

$$M = MAMDT = \frac{MTTR \times \frac{1}{MTBF} + MTPM \times \frac{1}{MTBPM}}{\frac{1}{MTBF} + \frac{1}{MTBPM}} \quad [4]$$

C'est en s'appuyant sur la connaissance des contraintes évoquées précédemment que les groupements fonctionnels d'appareils nécessaires aux calculs de sûreté de fonctionnement peuvent être constitués.

Les données disponibles à la SNCF au départ sont pour chaque lot de maintenance :

- ⇒ Le MTBF du bloc maintenu
- ⇒ Le MTTR du bloc maintenu
- ⇒ Le MTPM du bloc maintenu
- ⇒ Le MTBPM du bloc maintenu

On peut donc finalement déterminer le MTBM et le MAMDT (ou plus simplement M) qu'il faut fournir pour chaque lot de maintenance au logiciel pour tenir compte de la maintenance préventive. Ces deux indicateurs sont les alternatives opérationnelles respectivement du MTBF et du MTTR intrinsèques dans le cas qui nous occupe.

3.3 L'étude FDMS prévisionnelle du système maintenu :

Une nouvelle difficulté provient maintenant du fait que les valeurs des indicateurs de sûreté de fonctionnement sont données par lots de maintenance qui ne correspondent pas aux groupements fonctionnels que l'on choisirait pour décrire les modes de fonctionnement. Pour sa part, le logiciel de sûreté de fonctionnement utilisé prend plutôt en compte des **blocs fonctionnels** traduisant un mode de fonctionnement que des **lots de maintenance** rendant compte de pratiques de maintenance. Ces lots de maintenance sont en fait des groupes d'appareils qui subissent ensemble des interventions de maintenance préventive pour des raisons de sécurité (principe de la coupure visible etc...) et de commodité d'intervention. Il reste donc à partir des données par lot de maintenance à élaborer les données par blocs fonctionnels décrivant le mode de fonctionnement.

Ceci est effectué en pondérant les indicateurs de sûreté de fonctionnement opérationnels obtenus pour les lots de maintenance à hauteur de l'importance avec laquelle ces derniers contribuent au bloc fonctionnel considéré.

On peut finalement résumer la démarche FDMS pratique qui est employée pour modéliser et étudier un système d'alimentation de la traction électrique maintenu par l'organigramme suivant.

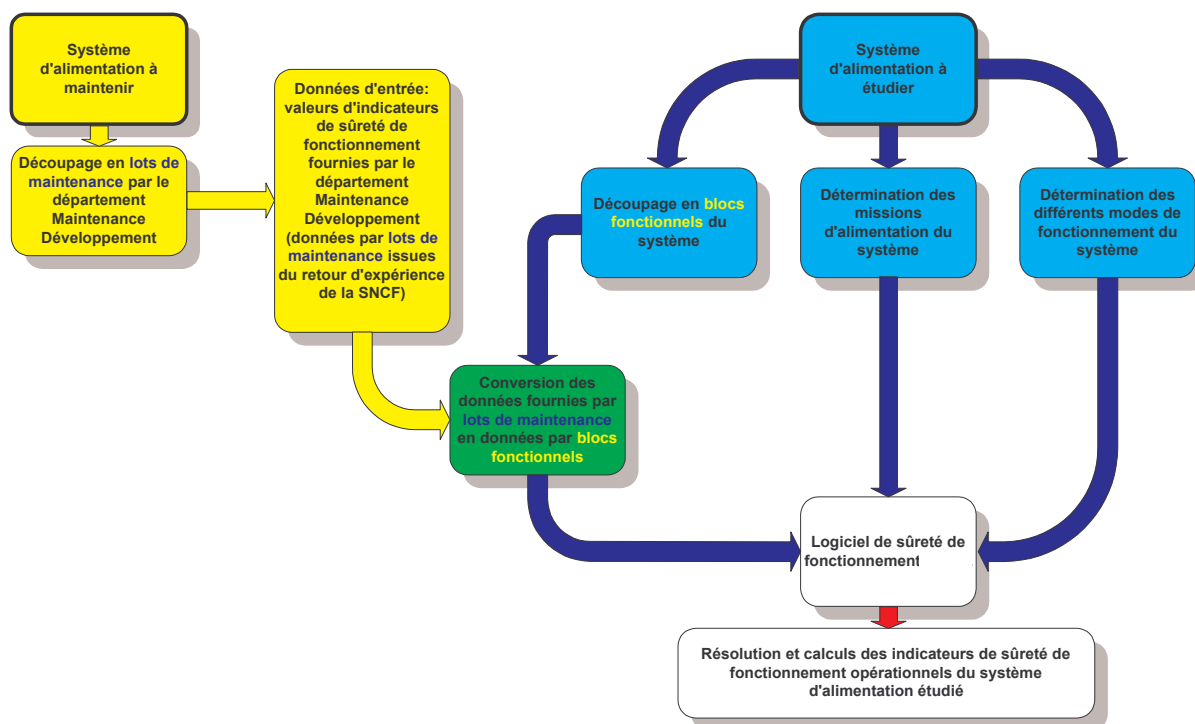


figure 2 : méthode d'approche prenant en compte la maintenance préventive pratiquée à la SNCF

On y retrouve en fait le schéma correspondant à la méthode classique sur lequel vient se greffer le traitement préalable des données d'entrée disponibles au département Maintenance et Développement afin de fournir au logiciel de sûreté de fonctionnement non plus des indicateurs de sûreté de fonctionnement intrinsèques mais des indicateurs de sûreté de fonctionnement opérationnels.

4. Des études prévisionnelles FDMS à la rédaction des cahiers des charges :

Associées au REX et aux données d'entrées déjà fournies par les constructeurs, les réflexions et calculs prévisionnels menés dans le cadre des études décrites précédemment permettent également à la Direction de l'Ingénierie d'optimiser les spécifications et la formulation des exigences FDMS lors de la rédaction des cahiers des charges des matériels électrotechniques destinés aux fournisseurs et constructeurs de matériels électrotechnique.

4.1 Les limites des relations contractuelles courantes

Les limites classiques des relations SNCF client/fournisseur et les difficultés rencontrées quotidiennement lors de la spécification des exigences en termes de FDMS se caractérisent en effet de part et d'autre par les constats suivants :

Côté SNCF client :

- Des réponses inexploitable (voire absence de réponse),

- Un engagement à minima sans preuves,
- Des surenchères non démontrées,
- L'impossibilité de consulter les documentations de maintenance avant livraison,

Côté fournisseurs :

- Des spécifications qui ne mentionnent pas forcément toutes les conditions d'utilisation et d'exploitation,
- Des indicateurs de sûreté de fonctionnement pouvant prêter à confusion.

4.2 L'apport de l'approche FDMS opérationnelle :

L'approche FDMS opérationnelle et les réflexions qui la précèdent permettent ainsi de préciser dans les cahiers des charges

- Les conditions d'utilisation et d'exploitation, dégagées lors de la phase de recherche des contraintes inhérentes au système (conditions particulières d'utilisation, mission de l'appareil, évènements redoutés),
- Des valeurs d'indicateurs de sûreté de fonctionnement que les fournisseurs doivent être en mesure de fournir et qui pourront par la suite être réintégrés à la modélisation lors de la phase d'élaboration des indicateurs de sûreté de fonctionnement opérationnels.

Pour ne citer que les principaux :

- la probabilité d'occurrence de chaque défaillance (traduite en MTBF ou MTTF (Mean Time To First Failure)). Les fournisseurs préfèrent fournir le MTTF et non pas le MTBF car ils ne dominent pas le temps de remise en état comprenant la détection, l'intervention, l'approvisionnement et le montage, le test et la remise en service. La fourniture du MTTF permettra de plus de caler les interventions de maintenance préventive.
- le temps nécessaire à la remise en état du système (MRT). Concernant ce MRT, la définition qui semble la plus cohérente est sans doute celle qui est explicitée dans la norme CEI 870-4 évoquée précédemment. Le MRT est défini comme une composante du MTTR, lequel MTTR se compose du temps administratif ou période de temps entre la détection d'une panne et la notification au service de maintenance, du temps de transport ou période de temps entre la notification au service de maintenance et l'arrivée sur place du personnel de maintenance muni du matériel nécessaire, du temps de réparation (MRT) ou durée moyenne nécessaire au personnel de maintenance qualifié une fois sur place, équipé des pièces de rechange et de l'équipement d'essai recommandé, pour diagnostiquer et réparer la panne et essayer l'équipement réparé. On comprend alors que seul le MRT peut sous ces définitions être fourni par le fournisseur. La fourniture du MTTR défini précédemment n'aurait de sens que si le fournisseur avait également la responsabilité de la maintenance.

5 Conclusion

Cet article peut sembler exposer une méthode fastidieuse, mais c'est le prix à payer pour pouvoir intégrer au cours des études FDMS présentes et futures la richesse du retour d'expérience dont disposent RFF (Réseau Ferré de France) et la SNCF pour les installations fixes de traction électrique.

En ce qui concerne l'approche FDMS opérationnelle elle-même, les faits marquants à retenir nous semblent être les suivants :

- Elle est applicable à l'ensemble des installations fixes de traction électrique d'une ligne électrifiée maintenue. Cela permet par exemple de répercuter en terme de disponibilité prévisionnelle de l'alimentation, l'impact d'une modification opérée sur un mode de fonctionnement, l'architecture d'une sous-station ou encore la mise en œuvre de nouveaux appareils de coupure,
- Elle est également très intéressante car elle débouche sur un enrichissement du dialogue et des échanges entre le client intégrateur qu'est la SNCF et les fournisseurs, notamment lorsqu'il s'agit d'aboutir à une compréhension commune des exigences FDMS dans les cahiers des charges des matériels électrotechniques.
- Cette démarche peut certainement s'appliquer à d'autres domaines d'activité que celui de la traction électrique chaque fois qu'il est nécessaire d'étudier un système maintenu.

En définitive, l'étude prévisionnelle FDMS peut être considérée elle aussi comme l'un des outils d'aide au diagnostic des signes avant coureur de défaillances afin d'éviter le défaut majeur. Elle intervient en effet très en amont, et permet de préparer l'avenir au plus tôt en réagissant dès la phase de conception du système d'alimentation électrique et d'écriture des cahiers des charges techniques des matériels électrotechniques.

Références

- [1] Commission Electrotechnique Internationale CEI 870 – 4 Matériels et systèmes de télé conduite – Quatrième partie : prescriptions relatives aux performances
- [2] NF EN 50126 – Applications ferroviaires – Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité (FDMS)- Edition de Janvier 2000
- [3] Military Standard – MIL-STD-1388-2B– DOD REQUIREMENTS FOR A LOGISTIC SUPPORT ANALYSIS RECORD 28 MARCH 1993 Annexe E section 3 article 001
- [4] P.CARER, G. CABRIEL et Y.LAVAGNE EDF/DER, Clamart: « Etudes de fiabilité, disponibilité et maintenabilité pour améliorer la qualité de service. » PQA 91-D-23
- [5] Pierre DERSIN, Didier DUPRE, Stéphane ROMEI ALSTOM : « Modèle d'estimation prévisionnelle de la disponibilité d'un système de transport ferroviaire » Colloque $\lambda\mu$ 11 29 Septembre au 1er octobre 1998.

[6] Bracquemond C. « Modélisation stochastique du vieillissement des appareils électromécaniques », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, à paraître en septembre 2001 ;

[7] Bracquemond C., Gaudoin O., Xie M. « Towards a new definition of failure rate function for discrete distribution ». Conférence internationale sur les modèles stochastiques et l'analyse de données, Compiègne, Juin 2001.

[8] Bracquemond C., Chevalier M. et Gaudoin O. « Modèles de fiabilité des systèmes non réparables en temps discret ». Colloque $\lambda\mu$ 12, Montpellier, 2000.

[9] Vocabulaire Électrotechnique International VEI 60050(191) – Sûreté de Fonctionnement – Commission Électrotechnique Internationale.

[10] Chevalier M., Lusson B. et Alain L. « Quand les clients et les fournisseurs s'accordent sur les critères de sûreté à retenir dans un appel d'offres ... » Fiabilité – Disponibilité – Maintenabilité – Journée d'études SEE Sûreté, Des atouts pour une électricité sûre et bon marché du 7 juin 2001.

Biographie Auteur : Lionel ALAIN

Ingénieur en Génie Electrique

Diplômé de l'ESME SUDRIA (1998)

En poste à la SNCF depuis janvier 2000, à la Direction de l'ingénierie Département des Installations Fixes de Traction Electrique (IFTE), il prend part aux études générales ainsi qu'aux études de dimensionnement des IFTE 25 kVca et 1500 Vcc (Sous-stations et postes) pour le compte des divers clients de la Direction de l'Ingénierie. Il participe également aux travaux de normalisations Européens concernant les Spécifications Techniques d'Interopérabilité (STI) Energie pour les lignes à grande vitesse et les lignes classiques.

