



**HAL**  
open science

## Retour d'expérience et évaluation de stratégies de maintenance

Daniel Noyes, François Pérès

► **To cite this version:**

Daniel Noyes, François Pérès. Retour d'expérience et évaluation de stratégies de maintenance. Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA), 2006, 40 (7), pp.721-743. 10.3166/jesa.40.721-743 . hal-03594439

**HAL Id: hal-03594439**

**<https://hal.science/hal-03594439>**

Submitted on 2 Mar 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID: 9964

**To link to this article:** DOI:10.3166/jesa.40.721-743

<http://jesa.e-revues.com/article.jsp?articleId=9086>

**To cite this version:**

Noyes, Daniel and Peres, François *Retour d'expérience et évaluation de stratégies de maintenance*. (2006) Journal Européen des Systèmes Automatisés, vol. 40 (n°7). pp. 721-743. ISSN 1269-6935

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# Retour d'expérience et évaluation de stratégies de maintenance

Daniel Noyes — François Pérès

Laboratoire Génie de Production Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes  
47, avenue d'Azereix B.P. 1629, F-65016 Tarbes cedex  
noyes@enit.fr, francois.peres@enit.fr

*RÉSUMÉ. Les stratégies de maintenance et leur évaluation, souvent déclinées dans la littérature, demeurent une préoccupation forte des entreprises dans la mesure où les enjeux économiques sous-tendus par l'activité de maintenance sont énormes. Le travail présenté dans cet article aborde la problématique d'évaluation des stratégies de maintenance sous l'angle du retour d'expérience. Une analyse statistique est faite à partir de l'examen des formes de distribution du taux de réparation. Les lois résultant de la mise en place d'une stratégie de maintenance donnée sont, en effet, révélatrices de la pertinence des choix à la base de cette stratégie. Une décomposition du processus de réparation en phases permet de mieux localiser l'influence des paramètres représentatifs de la stratégie. L'analyse des formes de distribution de chaque phase élémentaire constitue alors autant d'indicateurs de la performance d'ensemble de la stratégie étudiée.*

*ABSTRACT. The maintenance strategies and their evaluation are a problem which has been widely tackled. It remains however a topic to be considered since the economic stakes peculiar to this activity are huge. The work presented in this paper deals with this problematic under the point of view of data feedback. A statistical analysis is made from the examination of the forms of the failure rate distribution. The laws resulting of the implementation of a given maintenance strategy inform indeed about the relevance of the choices representative of this strategy. A decomposition of the repair process into phases allows a better identification of the influence of the strategy parameters. The analysis of each elementary phase distribution form represents then as many indicators of the global performance of the considered strategy.*

*MOTS-CLÉS : gestion de maintenance, évaluation de stratégies, retour d'expérience, taux de réparation, lois de distribution, statistique.*

*KEYWORDS: Maintenance management, strategy evaluation, data feedback, repair rate, distribution law, statistics.*

## 1. Introduction

Nous proposons dans cet article une méthodologie d'évaluation de stratégies de maintenance à partir des effets sur la dynamique des processus engagés pour le retour vers un état opérationnel. Contrairement à la plupart des travaux réalisés sur l'analyse des stratégies de maintenance, nous ne prenons pas, dans cette étude, la durée ou le nombre de défaillances comme point d'entrée mais nous considérons le temps consacré à la réparation comme variable-clé pour la définition et l'évaluation des politiques de maintien. L'approche est basée sur le traitement et l'analyse des données événementielles recueillies à partir d'historiques de comportement des équipements, systèmes monocomposants, sur lesquels s'applique la stratégie à évaluer. L'efficacité des stratégies est abordée sous l'angle de la disponibilité des systèmes qui en découle. L'article est divisé en cinq sections.

Dans la première section, nous resituons brièvement le problème général d'évaluation des stratégies de maintenance. Nous dressons ensuite un état de l'art résumé sur les formes de considération des processus de défaillance et de réparation. Nous rappelons dans la troisième section les techniques de traitement des données événementielles, à la base de la démarche d'évaluation. Nous montrons ensuite comment les processus correctif et préventif peuvent être décomposés en phases élémentaires que nous décrivons. Nous proposons des mécanismes simples de décomposition du temps de réparation lorsque les durées élémentaires ne sont pas directement accessibles. Enfin, à partir de la connaissance de l'influence des paramètres de maintenance sur les temps élémentaires et de la sensibilité du système à leur variation, nous proposons une démarche conduisant à l'évaluation de la stratégie de maintenance correspondante. Toutes les propositions sont illustrées sur un cas pratique correspondant à une situation industrielle réelle.

## 2. Evaluation de stratégies de maintenance

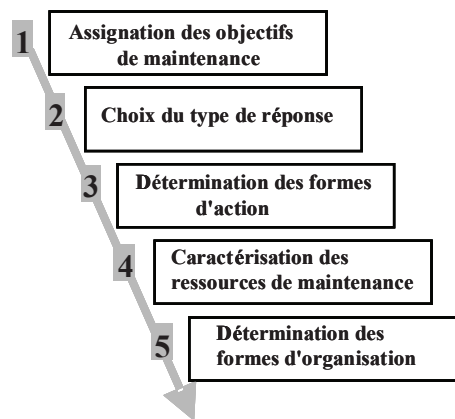
Parmi toutes les définitions existantes sur le terme stratégie, nous retenons celle-ci : « La stratégie est la détermination des buts et objectifs à long terme d'une organisation, l'adoption de modes d'actions et de politiques déterminées et l'allocation des ressources qui permettront d'atteindre ces buts et objectifs » (Chandler, 1989). D'autres définitions de ce concept peuvent être trouvées dans (Tarondeau, 1998) ou (Thiétart 2001).

Les stratégies de maintenance sont aussi variées que peuvent l'être les organisations industrielles et les systèmes sur lesquels elles s'appliquent. Cependant, toutes visent le maintien du système dans un état de bon fonctionnement, le plus longtemps possible ou la restauration la plus brève lors d'une défaillance. Des éléments de synthèse bibliographiques peuvent être trouvés dans (Valdez-Flores *et al.*, 1989 ; Pérès *et al.*, 2003).

La définition d'une stratégie de maintenance suit plusieurs étapes de raffinements successifs (Pérès, 1996) comme rapporté sur la figure 1.

– C'est d'abord l'assignation des objectifs qui doit passer par une analyse fine du contexte, sans être asservie aux ressources déjà identifiées en maintenance. Les objectifs du service seront un niveau de réponse aux requêtes, généralement formulées par la production en termes de disponibilité, fiabilité, qualité..., dans un cadre économique et de performances défini. Ces objectifs induisent déjà des orientations quant au mode de fonctionnement (maintenance sectorielle, centralisée, TPM).

– C'est ensuite l'identification du (des) type(s) de réponses prises dans le champ des actions préventives, curatives... Quoique d'un niveau encore élevé dans la définition de la stratégie, cette étape fait appel à des développements appliqués tels qu'étude de coûts, analyse d'historiques, examen des compromis entre impératifs de production et besoins de maintenance, prise en compte des normes de sécurité...



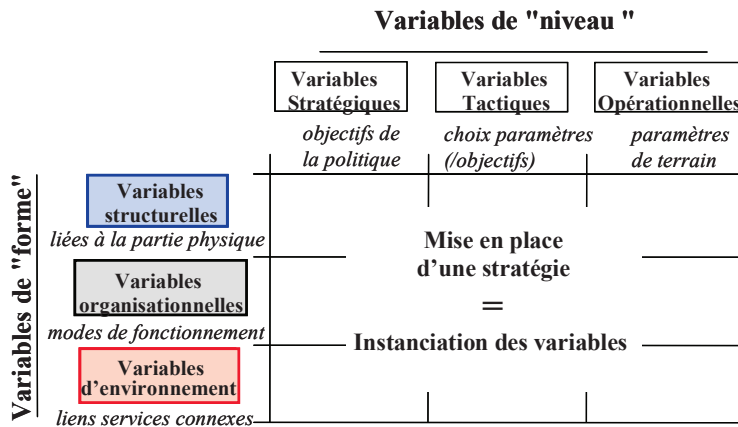
**Figure 1.** Etablissement de stratégies de maintenance

– La troisième étape est la détermination des formes d'action avec, en correctif : dépannage, remise en état, amélioration, réparation ou remplacement..., en préventif : intervention systématique, conditionnelle, à intervalles et durées fixes ou variables...

– L'étape suivante est la caractérisation des ressources de maintenance adaptées : ressources humaines et matérielles (atelier, magasin de pièces de rechange, outillage).

– La dernière étape définit complètement la stratégie par la détermination des formes d'organisation : composition et structuration d'équipes, élaboration de procédures, supports de communication, principes de contrôle et de validation.

La mise en place de la stratégie peut être vue comme l’instanciation d’un ensemble de variables qui forment le cadre d’action sur les plans décisionnel et opératoire (Noyes *et al.*, 1996). Nous introduisons deux formes de classification des variables de maintenance (figure 2).



**Figure 2.** *Mise en place d'une stratégie*

Ce sont d’abord les « variables de niveau »  $V_N$  qui permettent une partition selon des niveaux délimités par des considérations chronologiques d’initialisation de la variable mais aussi par les acteurs qu’elle concerne. Les variables de niveau sont divisées en :

- variables stratégiques, caractérisant les objectifs de la politique de maintenance. Elles sont les premières à être initialisées. Ces variables mettent en jeu les acteurs impliqués dans la définition des objectifs de maintenance. Elles traduisent les « mesures objectif » exprimées généralement sous forme de performance, l’unité choisie pour l’expression de celle-ci et la valeur cible devant être atteinte. Elles permettent aussi la définition d’une structure générale du système de maintenance et le choix d’une orientation stratégique ;

- variables tactiques, destinées à la représentation des paramètres nécessaires à l’atteinte des objectifs. Leur adoption et leur valeur dépendent directement des choix opérés au niveau des variables stratégiques dont elles découlent. Elles traduisent les grandes lignes de la stratégie. Ces variables sont établies par des personnes de maintenance. Elles caractérisent les choix entre maintenance préventive, systématique, conditionnelle, mixte et le rapport entre prévention et correction ;

- variables opérationnelles, correspondant aux paramètres « de terrain » à partir desquels l’ensemble des éléments de la stratégie peut être mis en place.

Ce sont ensuite les « variables de forme »  $V_F$  également partagées en trois groupes selon qu’elles s’attachent à la description de la structure d’un système et de

son contexte, aux formes d'organisation ou à la formalisation des échanges avec les autres services. Elles sont divisées en :

- variables structurelles, liées à la partie physique. Une intervention nécessite des moyens de maintenance humains (nombre de personnels), matériels (outillages, pièces de rechange) et, bien sûr, des ressources à maintenir (facultés de maintenabilité, mécanismes de détection et d'alertes à l'instant où la défaillance survient) ;

- variables organisationnelles, caractérisant le mode de fonctionnement, décrivant les relations internes du service, définissant les modes de comportement et les types de réaction face à des situations variées. Ces variables traduisent une organisation des moyens humains (compétences, constitution des équipes, responsabilités), matériels (gestion des stocks, des outillages) et des équipements à maintenir (gammes d'intervention, niveau de priorité) ;

- variables d'environnement qui établissent les liens existant avec les services connexes au service maintenance : production (relations (clients/fournisseurs, partenaires), forme de contraintes (coût, délai, disponibilité, sécurité, qualité)), direction technique (budget, degré d'autonomie). Ces variables, issues d'un service voisin ou d'un niveau hiérarchique supérieur sont davantage subies par le service de maintenance que réellement définies. Leur initialisation est cependant négociée et, même si le choix final de la valeur n'est pas fixé par le service de maintenance, nous les conservons à ce titre. Elles apparaissent ici comme descriptives du cadre d'action dans lequel doit évoluer le service maintenance et interviennent pour la plupart très tôt dans l'ordre de définition.

L'analyse des variables fait apparaître des liens étroits, sans précedence hiérarchique, entre variables structurelles et organisationnelles d'un même niveau. Ces variables sont en outre influencées, d'une part, par les variables d'environnement de leur niveau et, d'autre part, par les variables organisationnelles et structurelles du niveau supérieur. Le choix des variables d'un niveau est donc global, dicté par une analyse simultanée des compromis réalisés pour chaque variable. La connexité est très forte et l'optimalité de la solution d'autant plus difficile à évaluer.

### **3. Maintenance, défaillance, réparation : état de l'art**

Les processus de défaillance et de réparation sont au cœur de la définition des stratégies de maintenance et de la réalisation de leur performance. Nous résumons ci-après les principales formes rencontrées dans la littérature.

#### **3.1. Formes de défaillance**

Les causes de défaillance sont généralement considérées comme étant d'origine systémique, résultats de phénomènes d'usure, de fatigue, de jeunesse ou purement

aléatoires. D'autres types de causes comme, par exemple, les fautes humaines (Bee *et al.*, 1999 ; Sridharan *et al.*, 1998) ou de conception (Moss, 1999 ; Haken, 1998) peuvent cependant figurer dans les modèles.

La défaillance des systèmes multicomposants peut être caractérisée par la défaillance progressive d'un certain nombre de ses entités ou par un mode de défaillance commun à l'ensemble des  $n$  composantes du système (Papazoglou, 1999). Dans le premier cas, le système peut être déclaré défaillant à l'occurrence de la première défaillance locale (cas série) (Gupta *et al.*, 1993) ou à la défaillance de  $k/n$  entités (redondance active ou passive) (Levitin *et al.*, 1998).

Deux grandes classes de défaillances ressortent dans la littérature : les défaillances cataleptiques et les défaillances progressives. La différence porte sur la rapidité de basculement du système vers un état défaillant. Ce passage peut être immédiat dans le cas de systèmes « binaires » (bons ou mauvais) (Ohnishi *et al.*, 1994), il peut être étagé en niveaux progressifs, le dernier niveau étant évidemment l'état de défaillance. Dans ce deuxième cas, la détérioration peut être discrète (Ohnishi *et al.*, 1994) ou continue (Hontelez *et al.*, 1996). La détérioration discrète peut être interprétée comme la quantité de dommages du système consécutive à des chocs, cette quantité augmentant d'un montant fixe, variable ou aléatoire à certaines dates (Makis, 1999). (Kapur *et al.*) 1990 font l'hypothèse que les instants d'occurrence des chocs sont limités, leur échelle de temps étant elle-même discrète. Le nombre d'états correspondant aux niveaux respectifs de détérioration est généralement ignoré mais certains travaux cependant le fixent *a priori*. La défaillance survient après  $k$  chocs ou passages du système dans  $k$  niveaux de détérioration (Haugen *et al.*, 1997). Le nombre de niveaux augmente ainsi progressivement selon les travaux pour atteindre, dans le cas d'un nombre infini de chocs sur un horizon délimité, la modélisation de la détérioration continue.

La détérioration continue correspond à un processus de dégradation progressif et régulier assimilable à un phénomène d'usure ou de fatigue (Hopp *et al.*, 1998). Le système est déclaré défaillant après franchissement d'un seuil. Dans (Makis, 1999 ; Haugen *et al.*, 1997), la détérioration est à la fois discrète et continue, des modes de défaillance liés à l'utilisation du système étant superposés au phénomène d'usure.

La maintenance préventive n'a d'intérêt que dans la mesure où elle s'applique à un système dont le taux de défaillance n'est pas constant. Pourtant l'hypothèse poissonnienne, sans doute pour sa simplicité d'utilisation, est largement utilisée pour la modélisation du processus de défaillance (Vanderperre *et al.*, 1997). Quantité de travaux utilisent cependant d'autres lois plus réalistes, représentatives de taux de défaillances différents. Dans (Dedopoulos *et al.*, 1998), le taux est croissant mais la loi n'est pas explicitée. La loi de Weibull, réputée pour traduire assez fidèlement l'allure du taux de défaillance mais difficile de manipulation, n'est utilisée que dans quelques travaux (Vaurio, 1997 ; Tseng, 1996). La loi d'Erlang apparaît également dans (Pellegrin, 1992). Enfin, certains travaux considèrent des lois de Poisson non-homogènes (Christer, 1999 ; Sheu, 1998), des distributions log-normale (Siddiqui *et*



*al.*, 1995), la loi des valeurs extrêmes (Tseng, 1996) ou des taux arbitraires (Liu, 1998) pour caractériser le phénomène de défaillance. Nous trouverons dans la section 5 une caractérisation expérimentale de certaines lois.

Dans un système multicomposant, les défaillances de chaque entité n'influent généralement pas sur le comportement en fiabilité des autres composants (Papazoglou, 1999). (Albin *et al.*, 1992) considèrent eux un système multicomposant avec dépendance. La défaillance d'un composant entraîne parfois la croissance du taux de défaillance des composants voisins.

Jusqu'ici, n'ont été évoquées que des sources de défaillances émanant du système. Les ressources de maintenance peuvent être, elles aussi, à l'origine de dysfonctionnement en ne permettant pas la restauration correcte et complète du système vers l'état de bon fonctionnement. En effet, ces ressources peuvent être elles-mêmes soumises à des défaillances (Coetze, 1997) ou non disponibles lors de la défaillance du système (système multicomposant à ressources de maintenance limitées) (Hagin, 1997).

Dans le cas de maintenance conditionnelle, on note également la possible défaillance du système de surveillance (Sherwin, 1990). Dans (Paté-Cornell *et al.*, 1987), il est montré comment les erreurs dans l'interprétation des résultats de l'inspection (maintenance systématique) ou des signaux (maintenance conditionnelle) peuvent conduire à deux types d'erreurs caractérisées par les risques  $\alpha$  et  $\beta$ . L'erreur de type I consiste à surestimer ou « inventer » un problème (risque  $\alpha$ ). L'erreur de type II correspond à sous-estimer ou ignorer un problème (risque  $\beta$ ). Bien que l'erreur I soit moins conséquente que l'erreur II, les deux sont préjudiciables au fonctionnement du système, obligeant selon le cas à arrêter celui-ci sans raison ou à le laisser sans intervention préventive jusqu'à une défaillance prochaine.

### **3.2. Formes de réparation**

La réparation est généralement consécutive à la défaillance du système ; elle peut cependant suivre une inspection ou intervenir à l'apparition d'un signal (Sherwin, 1990). Son déclenchement est immédiat (Paté-Cornell *et al.*, 1987) ou différé (Sherwin, 1990). A cause de contraintes de production sévères, les réparations peuvent être programmées à dates fixées (Barbera *et al.*, 1996) et dans des temps impartis (Salameh *et al.*, 1997). Ce caractère de programmation implique un découplage entre la nature de la réparation et la gravité de la défaillance. Plus naturellement, une relation directe est établie entre la durée de réparation et l'état de dégradation du système. Dans (Paté-Cornell *et al.*, 1987), le niveau de réparation est dépendant de la nature du signal émis par le système. Par hypothèse simplificatrice, d'autres auteurs considèrent au contraire un seul niveau de réparation ramenant le système à l'état neuf (Cheng *et al.*, 2001).

Le lieu de réparation n'est pas souvent évoqué dans les travaux. Waganer (2001) distingue le niveau de défaillance, autorisant une réparation sur site, de celui nécessitant l'acheminement de la partie défaillante sur une zone d'intervention propice. Le nombre de réparateurs et, plus généralement, de ressources, est généralement supposé dimensionné pour éviter toute indisponibilité du service de réparation à l'occurrence d'une défaillance. Dans (Wang *et al.*, 1998) et (Iravani *et al.*, 2000) toutefois, le nombre de réparateurs est restreint. Il est limité à une seule personne dans (Che *et al.*, 2001).

#### **4. Traitement des données événementielles**

La définition et l'optimisation des stratégies de maintenance doivent s'appuyer sur les lois événementielles qui régissent l'évolution des systèmes. Pour cela, l'agent de maintenance doit d'abord connaître la nature de ces lois. Deux étapes sont nécessaires : la collecte des données et leur traitement.

##### **4.1. Collecte des données**

La saisie d'informations relatives aux caractéristiques des processus de défaillance et réparation peut concerner la date, la description et la durée de l'intervention, la nature, la cause et la gravité de la défaillance... Les données sont ensuite exploitées à des fins d'aide à la gestion et à l'organisation de la maintenance.

Nous illustrons cette partie de traitement des informations, recueillies à partir d'un cas industriel où nous disposons d'une base de données événementielles sur les défaillances et réparations de machines : quatre centres d'usinage similaires (CU 100) 4 axes (X, Y, Z, B) équipés d'une CN NUM460 et d'un automate TSX 80.

Les informations sont extraites de plannings hebdomadaires renseignés par les opérateurs de production ou de maintenance et représentent les séquences de bon fonctionnement et d'immobilisation des machines. Les raisons d'arrêt et les opérations effectuées sur la machine immobilisée sont précisées, ce qui permettra de tirer des conclusions par rapport à la typologie des défaillances. Les machines fonctionnent en deux postes soit 17 h par jour (2\*8+1h en « aveugle » le soir). Cette contrainte de sollicitation laisse peu d'interstices pour des interventions de maintenance préventive. Celles-ci sont effectuées globalement selon une période annuelle. Elles ne sont donc pas prises en compte ici.

Le relevé des temps de bon fonctionnement correspond à deux années d'observation pour les quatre machines, celui des durées des réparations correspond à quatre années d'observation supplémentaires.

Les résultats portés dans le tableau 1 correspondent aux valeurs, relevées et classées par durée croissante, des temps de bon fonctionnement et de réparation des quatre centres. On considère pour cela qu'il y a régénération du processus après

réparation ce qui permet de considérer les variables comme identiquement distribuées et indépendantes.

Les temps de réparation sont complétés par une information sur la nature de la défaillance constatée : les indices e, m, i, a indiquent le type de défaillance, respectivement électrique, mécanique, informatique ou autre.

2	3	8	9	11	11	0,25a	0,25a	0,5a	0,5a	0,5e	0,5e	0,5e	0,5e	0,5e	0,5e	0,5i	0,5i	0,5i	0,5i	0,5i	0,75e	0,75e	0,75i
12	14	14	15	22	28	1e	1e	1e	1e	1e	1e	1e	1e	1e	1e	1e	1e	1e	1e	1e	1i	1i	1i
29	29	30	31	35	48	1i	1i	1i	1i	1i	1i	1m	1m	1a	1a	1a	1a	1a	1a	1a	1a	1a	1,25i
51	52	55	58	59	60	1,5a	1,5a	1,5a	1,5a	1,5a	1,5a	1,5e	1,5e	1,5e	1,5e	1,5e	1,5e	1,5i	1,5i	1,5i	1,5m	1,75e	2m
60	65	66	67	81	82	2m	2m	2m	2m	2m	2m	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a
83	83	84	89	89	90	2a	2a	2a	2a	2e	2e	2e	2e	2e	2e	2e	2e	2e	2e	2e	2i	2i	2i
93	96	96	97	98	99	2i	2,5a	2,5a	2,5a	2,5e	2,5e	2,5i	2,5i	2,5i	2,5i	2,5m	2,5m	2,5m	2,5m	3a	3a	3a	3a
102	110	112	115	129	129	3a	3a	3a	3e	3e	3e	3e	3e	3e	3e	3e	3i	3i	3i	3i	3i	3m	3m
136	148	148	148	153	156	3m	3m	3m	3,5a	3,5i	3,5i	3,5m	4a	4e	4e	4e	4i	4i	4i	4m	4m	4m	4,5e
160	162	162	165	166	179	5e	5e	5e	5i	5a	5a	5,5a	5,5i	6e	6i	6m	6m	6,5i	6,5m	6,5m	6,5m	7e	7e
182	183	186	189	192	195	7i	7m	7a	7a	7a	7a	7,5m	8a	8a	8i	8m	8m	8m	8m	8,25a	8,25a	8,5e	8,5e
217	225	227	232	234	248	9a	9e	9e	9i	9i	9,5a	9,5m	10a	10i	10i	10m	10,5a	10,5m	11a	11a	11i	11i	11i
249	252	296	301	319	366	11,5i	11,5i	12a	12a	12m	12,5e	12,5m	13i	13i	13e	14m	14a	14,5e	14,5e	14,5e	14,5e	14,5m	15a
378	385	387	388	418	434	15e	15i	15i	16e	16m	16,5m	17m	17a	17a	17,5m	18a	18e	18i	18,5e	19m	19e	19i	20a
472	473	483	502	514	579	21a	21a	21e	22a	22a	22e	22m	22,5a	22,5m	22,5m	23e	23a	24e	24,5m	25e	27,5m	28a	28,5m
631	732	760	823	854	890	34i	35i	36m	37e	38a	38,5e	39e	39i	39,5m	39,5m	40,5m	45,5m	46a	47,5m	48,5e	51m	51m	51,5m
918	1042	1045	1148	1242	1293	65m	68a	78,5m	81m	81m	85m	94,5m	95,5e	96i	103,5e	115i	132i	140,5m	148a	153a	191,5	204a	207m
1941						274i	439e																
<i>Temps de bon fonct.</i>						<i>Temps de réparation</i>																	

**Tableau 1.** Relevé des temps élémentaires

#### 4.2. Exploitation des données

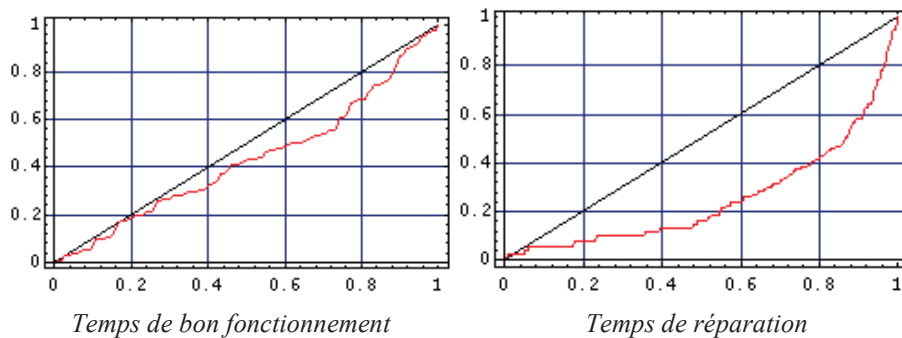
L'exploitation des données passe par la connaissance des distributions des temps associés aux processus étudiés. La première étape est de tester l'exponentialité de l'échantillon. Des tests non paramétriques sont utilisés pour déterminer le caractère de la distribution par comparaison à la loi exponentielle. Ces tests orientent vers le choix d'une loi pour la représentation de la distribution des durées de l'échantillon.

La conformité de la loi par rapport à l'échantillon peut alors être estimée par des tests classiques d'adéquation. Classiquement, les formes de répartition des données événementielles des systèmes de production sont comparées à une distribution exponentielle. Nous avons considéré deux méthodes : le test de linéarité et celui de la méthode TTT (*Total Time on Test*). Nous ne donnons ici que les résultats de la

méthode TTT normalisée dont le lecteur pourra trouver la description dans (Barlow *et al.*, 1975) et qui possède les propriétés suivantes :

- l'abscisse et l'ordonnée de la représentation sont bornées à 1 ;
- la transformée de la distribution exponentielle est représentée par la première bissectrice ;
- les représentations de fonctions correspondant à des taux croissants ou décroissants sont respectivement situées au-dessus et au-dessous de la droite à 45 °.

L'application des tests d'exponentialité aux échantillons de référence (figure 3) montre que les temps de bon fonctionnement sont approximativement exponentiellement distribués (taux constant), la distribution des temps de réparation correspond à un taux de hasard décroissant.



**Figure 3.** Courbes TTT

Ce constat, *a priori* inattendu, d'une caractéristique hyper-exponentielle contraste avec celui d'autres systèmes davantage connus (électriques, par exemple) qui présentent une caractéristique plutôt hypo-exponentielle (taux de hasard croissant dans le temps).

Une explication à ce phénomène est que la complexité des machines induit des défaillances et des réparations de natures très diverses ; la tendance hyper-exponentielle constatée est due à la pondération de plusieurs variables aléatoires différentes, chacune correspondant à un type de réparation et pouvant, peut-être, présenter des caractéristiques hypo-exponentielles (taux de hasard décroissant dans le temps).

Sans anticiper sur la suite de l'article, il apparaît aussi que les temps d'attente de réparation occupent une importance considérable dans le processus de réparation de défaillances mécaniques. Cette attente est souvent due à un problème d'approvisionnement de pièces de rechange et est certainement à l'origine de la singularité dans la distribution du processus global : plus la réparation tarde à

apparaître, plus le risque d'avoir basculé dans un problème d'approvisionnement (impliquant une réparation retardée) croît.

### 4.3. Caractérisation des lois

Parmi les lois couramment considérées pour l'identification des processus pris en compte dans les modèles d'évaluation de la fiabilité, il est à noter : la *loi exponentielle*, représentative des distributions des temps de bon fonctionnement durant la période de maturité des équipements, la *loi normale*, appliquée à des phénomènes de fatigue ou d'incertitudes, la *loi log-normale*, souvent attachée à la représentation des durées de réparation, la *loi de Weibull*, caractérisée par trois paramètres rendant la loi très souple et propice à la représentation des distributions des temps de bon fonctionnement durant les périodes de jeunesse ou de vieillissement, la *loi d'Erlang*, utilisée pour couvrir des problèmes de transport du matériel, des durées de réparation et qui peut être étendue à la représentation de nombreux phénomènes.

Les caractéristiques de ces lois (fonction de densité, de répartition ou de survie, taux de hasard, espérance, écart type, variance...) sont décrites dans tous les ouvrages de statistiques, nous ne les rappelons pas. L'identification des paramètres des lois approchant la distribution empirique peut être faite analytiquement (procédures de calculs) ou graphiquement (utilisation de papiers fonctionnels). Les lois représentatives des deux échantillons sont :

– pour les temps de bon fonctionnement : la loi exponentielle de paramètre  $\lambda=0,00375$  ;

– pour les durées de réparation : la loi normale de paramètres  $\mu = 17,85$  et  $\sigma = 42,49$ , la loi Log-normale de paramètres  $\mu = 1,66$  et  $\sigma = 1,47$ , la loi de Weibull de paramètres  $\beta= 0,79$  et  $\eta=10,88$  pour un taux de hasard exprimé sous la forme :  $\lambda(t) = \beta/\eta \cdot (t/\eta)^{\beta-1}$ .

### 4.4. Tests d'adéquation

Chaque méthode d'identification des lois délivre les paramètres associés à la loi la plus proche. Des tests d'adéquation existent pour vérifier si la loi identifiée est la plus représentative de la forme de distribution de l'échantillon et attribuer un niveau de confiance entre cette loi ajustée et l'échantillon qu'elle modélise. Deux tests sont classiquement exploités pour la validation des modèles : le test du  $\chi^2$  pour des échantillons relativement importants) et celui de Kolmogorov Smirnov.

Appliqués aux échantillons de référence, ces tests ont permis d'accepter avec un niveau de confiance supérieur à 90 % la loi exponentielle de paramètre  $\lambda= 0,00375$  pour la distribution des temps de bon fonctionnement et la loi de Weibull de paramètres  $\beta= 0,79$  et  $\eta=10,88$  pour la distribution des temps de réparation. Les lois

normale et log normale s'avèrent en revanche ne pas être représentatives des formes de distribution des temps de réparation contenus dans l'échantillon de référence.

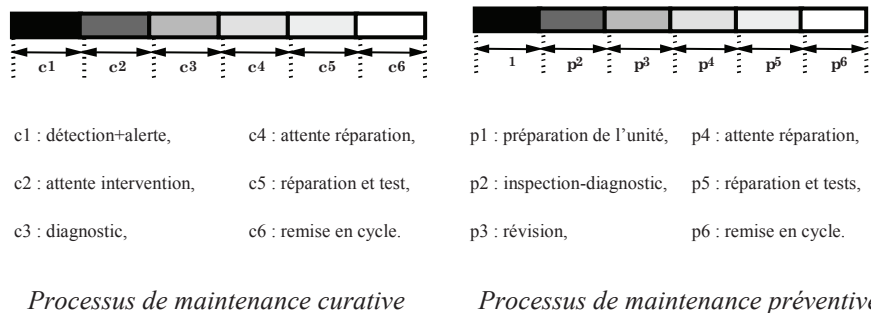
## 5. Décomposition du temps de réparation

Il est possible de décomposer le temps global d'immobilisation en séquences élémentaires correspondant aux étapes du processus de maintenance considéré. Cette décomposition permet de simplifier le travail d'identification des paramètres mis en jeu et de visualiser la localisation de leurs effets. Dans ce contexte, nous proposons une décomposition des mécanismes principaux de la maintenance du système sous ses aspects correctif et préventif.

### 5.1. Maintenance corrective

Pour le processus de réparation, inscrit entre les instants de défaillance et de remise en service de l'équipement, une première partition en deux phases peut être établie. La première phase, conduisant à un diagnostic, correspond à toutes les actions entreprises pour caractériser la défaillance et la deuxième, aboutissant à la remise en cycle de l'équipement, regroupe toutes les actions effectuées pour réparer.

La décomposition peut être aussi réalisée à des niveaux de détail plus poussés. Nous considérons ainsi une décomposition du processus de réparation en six phases, séquentielles et affectées d'une durée (figure 4).



**Figure 4.** Relevé des temps élémentaires

### 5.2. Maintenance préventive

Pour le processus de maintenance préventive, compris entre l'instant de mise à disposition de la machine par la production et l'instant de retour dans l'état physique occupé avant l'intervention, deux phases distinctes sont souvent constatées : d'abord, la réalisation d'une série d'opérations programmées et, généralement,

gammées, puis celle d'opérations liées au constat d'anomalies exigeant une intervention rapide sous peine de conduire à la défaillance. A ce niveau, deux attitudes sont possibles : soit il est directement procédé à la réparation des organes incriminés, soit le système est réengagé en production après accord sur une date d'intervention ultérieure.

Comme pour le processus de maintenance corrective, la décomposition de la durée de révision peut être affinée. Les phases<sup>1</sup> ainsi dégagées du processus, sont également données sur la figure 4.

## 6. Influence de la stratégie sur les temps élémentaires

Le déroulement de chaque phase, tant dans le processus curatif que préventif, est évidemment influencé par les variables de maintenance fixant la stratégie retenue. Les liens sont particuliers à chaque phase mettant en jeu des ressources matérielles et humaines qui lui sont propres. Nous ne développons pas ici ces dépendances mais nous donnons seulement une illustration pour la première phase  $\phi 1$  du processus curatif.

La durée de  $\phi 1$  est directement liée au niveau d'instrumentation du processus surveillé, à la logique de détection (algorithmes, outils d'IA, mécanismes de RàPC...) ainsi qu'à l'architecture du réseau d'alerte.

La solution instanciée peut être, elle aussi, à l'origine de défaillances ; le dysfonctionnement du système de surveillance peut ainsi conduire, par une mauvaise interprétation des signaux, aux deux types d'erreurs caractérisées par les risques  $\alpha$  et  $\beta$  (Paté-Cornell *et al.*, 1987) avec la surestimation ou « l'invention » d'un problème (risque  $\alpha$ ) ou sa sous-estimation ou ignorance (risque  $\beta$ ).

Notons encore que si la plupart des opérations sont souvent réalisées en interne, certaines peuvent faire appel à des compétences externes. Les techniques de e-maintenance peuvent être d'un apport conséquent dans le déroulement de l'intervention. Ainsi, la phase  $\phi 1$  peut être rendue plus efficace et réactive par engagement de moyens de e-surveillance et e-détection permettant contrôles, tests et consultation d'alarmes à distance, depuis un ou plusieurs postes distants adaptés au traitement d'une information proactive, ce qui rend possible, par exemple, la préalarme par détection des dérives avant dysfonctionnement.

Nous allons par la suite nous appuyer sur la décomposition du processus en phases élémentaires et sur la connaissance des durées associées, pour étudier, par examen des variations de ces durées, l'effet des modifications apportées par les variables influentes d'une stratégie de maintenance.

---

1. Dans le cas d'une maintenance conditionnelle, l'apparition de signes précurseurs de défaillance génère une séquence de phases de même nature que le processus curatif (lors des phases d'inspection  $p2$  et révision  $p3$  de l'unité, une défaillance cachée est mise en évidence et entraîne la réalisation des phases  $p4$  et  $p5$  de manière similaire aux actions curatives).

### 6.1. Règles de décomposition

Actuellement, les informations sur les durées des phases élémentaires ne sont pas encore souvent directement disponibles dans les relevés expérimentaux. La situation évolue cependant rapidement. De plus en plus de systèmes sont placés dans des conditions de contrôle fin et sont instrumentés en conséquence. Dès lors que le besoin est spécifié, il est souvent relativement facile de mettre en place les « mécanismes » de saisie et les procédures permettant cette capture des informations.

Dans le cas particulier où ne sont fournies que les données « brutes » correspondant à la durée globale du phénomène considéré : temps de bon fonctionnement, temps de défaillance, temps de révision et certaines durées de phases (temps d'alerte, durée effective de la réparation...), des aménagements sont encore possibles.

Nous proposons des règles  $R_d$  (règles de décomposition), qui, partant de la durée globale de l'opération considérée (réparation, révision...), décomposée en  $P$  phases, permettront d'associer à chaque phase la durée élémentaire correspondante.

Chaque règle est une application  $R: D \rightarrow D_i$  avec  $D$  durée globale de l'opération,  $D_i$  durée élémentaire de la phase  $i$  et  $D = \sum_{i=1}^P D_i$ .

Nous nous appuyons, pour établir les relations existantes entre  $D$  et  $D_i$ , sur la connaissance d'experts et les règles de métier recueillies par consultations des services de maintenance.

Pour les cas traités, cette analyse a montré que :

- l'expert différencie les situations suivant la durée globale  $D$  de l'opération (distinctions de classes) ;
- les durées  $D_i$  peuvent être établies suivant l'expression générale :  $D_i = k.D + C$  (avec  $k < 1$ ) traduisant la proportionnalité au temps global  $D$  et une durée minimale fixe ;
- il peut être intéressant d'utiliser le formalisme flou pour saisir les appréciations d'experts (Gouriveau, 2003).

Nous proposons sur la figure 5 une illustration de la lecture des règles pour la phase  $\phi_4$  en maintenance curative. Par exemple, pour une réparation de 16 heures, la phase  $\phi_4$  dure environ 7 heures (le plus souvent, attente de pièce).



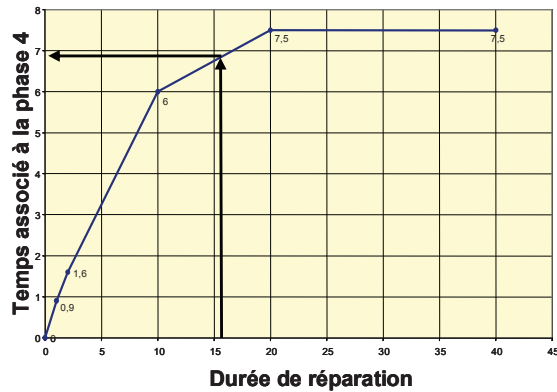


Figure 5. Durée de la phase  $i$  en fonction de la durée globale

## 6.2. Application à l'échantillon de référence

Nous appliquons cette décomposition à l'échantillon initial des temps globaux de réparation, distinguant les défaillances électriques, mécaniques, informatiques et autres défaillances.

Il est défini pour chaque type de défaillance cinq classes d'interventions caractérisées par la durée globale de la défaillance : *immédiate* (réalisée dans l'heure suivant l'apparition de la défaillance), *rapide*, *longue* (complexité de la réparation), *retardée* (indisponibilité de ressource de maintenance), *suspendue* (acheminement de pièces de rechange). Les bornes des classes varient en fonction des types de défaillances électriques, mécaniques... Par exemple, à gravité égale, les interventions mécaniques prennent plus de temps que les interventions électriques ou informatiques (éléments encombrants, peu accessibles...); par contre, le temps nécessaire de diagnostic est moins grand.

Nous donnons dans le tableau 2, les valeurs des coefficients  $k$  et  $C$ . Par exemple, pour une réparation électrique (classe 3) d'une durée de 5h, la phase de diagnostic  $\varphi_3$  a une durée :  $t\varphi_3 = 5 \times 15\% = 0,75h$

Ces règles, élaborées à partir de la connaissance d'experts, peuvent être progressivement complétées par l'intégration de données réelles. La prise en compte de ces données expérimentales (par exemple, par les principes de calcul bayésien (Becker *et al.*, 1999) permettra d'ajuster la règle  $R_d$  correspondante.

		Type e						Type i						Type m						
Classe Phase		$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\varphi_5$	$\varphi_6$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\varphi_5$	$\varphi_6$	Classe	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\varphi_5$	$\varphi_6$
Classe 1	k			10		90				8,5		15		Classe 1			10		90	
0->1h	C													0->1h						
Classe 2	k	10	20	10	50	10		10	20	35		35		Classe 2	2,5	5	2,5	12,5	77,5	
1h->2h	C	-0,1	-0,2		-0,5	0,8		-0,1	-0,2	0,5		-0,2		1h->2h	-0,025	-0,05	0,075	-0,125	0,125	
Classe 3	k		3,75		18,75	59,375	3,125		3,75	2,5	46,875	43,75	3,125	Classe 3		3	2	15	77,5	2,5
2h->10h	C	0,1	0,125		0,125	-0,187	-0,062	0,1	0,125	1,15	-0,937	-0,375	-0,062	5h->15h	0,1	0,05	0,1	-0,25	0,125	-0,125
Classe 4	k			5	105	-17,5	7,5			5	87,5		7,5	Classe 4			3,33	86,67	5	5
10h->20h	C	0,1	0,5	0,9	-8,5	7,5	-0,5	0,1	0,5	0,9	-5	4	-0,5	15h->30h	0,1	0,5	-0,1	-11	11	-0,5
Classe 5	k				100						100			Classe 5				102,5	-2,5	
20h-> $\infty$	C	0,1	0,5	1,9	-7,5	4	1	0,1	0,5	1,9	-7,5	4	1	30h-> $\infty$	0,1	0,5	0,9	-15,75	13,25	1

Tableau 2. Règles Rd de décomposition de l'échantillon

## 7. Exploitation des indicateurs

### 7.1. Analyse des distributions

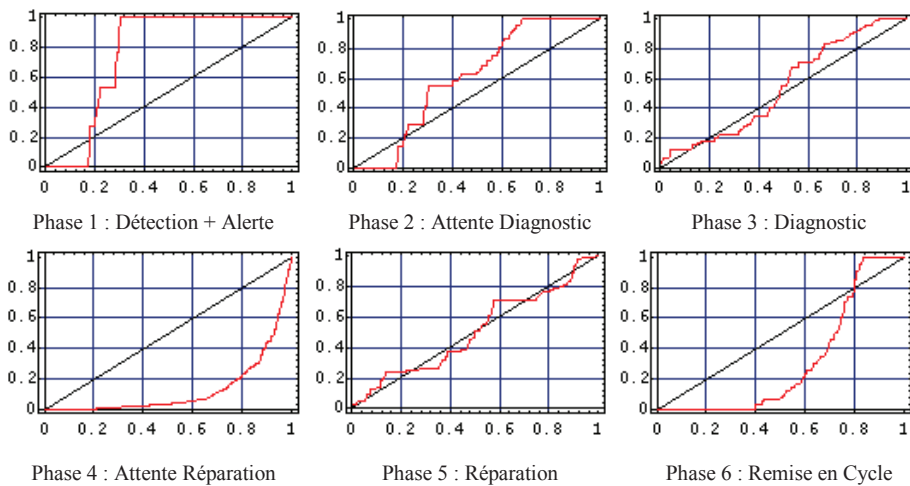
Nous montrons dans cette section comment analyser les formes de distribution des temps associés aux phases élémentaires  $\varphi_i$  et exploiter les informations récupérées. Un premier constat sur l'exemple traité est que le taux de hasard croissant correspondant à la distribution de l'échantillon de référence n'est pas retrouvé sur l'ensemble des distributions (figure 6).

Certains taux sont croissants (distributions hypo-exponentielles associées aux phases alerte + détection et attente diagnostic). D'autres sont sensiblement constants (diagnostic, réparation pure). D'autres enfin, comme les temps associés aux phases  $\varphi_4$  et  $\varphi_6$  sont décroissants. On retrouve ici pour la phase  $\varphi_4$  les bases de l'explication avancée dans le paragraphe 4.2 sur le comportement hyper-exponentiel des taux de réparation de défaillances mécaniques.

En pratique, il est possible pour l'analyste de dégager, à partir de l'examen des formes de distribution, des conclusions sur la situation de maintenance considérée : caractère avantageux ou pénalisant des caractéristiques, raisons de ces constats...

Cet examen permet, selon le cas, de conforter ou corriger les choix de stratégie de maintenance et de soutien logistique.

Dans l'exemple considéré, le constat d'un taux de hasard décroissant sur la distribution des temps d'attente de réparation doit inciter à intervenir sur le processus d'approvisionnement des rechanges.



**Figure 6.** Distribution des temps des phases élémentaires

## 7.2. Sensibilité du système

Nous étudions ici le comportement du système à travers l'évolution des distributions des temps des phases élémentaires  $\phi_i$  lorsque des modifications sont apportées à la stratégie de maintenance. Des changements vont intervenir sur les durées élémentaires de chaque phase  $\phi_i$  du processus ; elles apparaîtront au niveau des échantillons (résultat d'une saisie directe des durées élémentaires de chaque phase et/ou modifications des règles  $R_d$  de décomposition).

L'analyse des formes de distribution et du sens de leur évolution par rapport à la distribution initiale permettra de renseigner sur le bien fondé des actions d'amélioration proposées. Illustrons cette situation.

Les règles  $R_d$  présentées dans le tableau 2 sont la conséquence d'une modification de stratégie de maintenance sur trois points :

- augmentation de l'effectif de maintenance (amélioration de la réactivité) ;
- stockage de pièces de rechange plus conséquent (réduction des temps d'approvisionnement) ;

– dotation d'un équipement accroissant la testabilité du système (diminution du temps de diagnostic).

Si nous reprenons l'exemple utilisé pour illustrer l'emploi du tableau 3 d'une réparation électrique (classe 3) d'une durée de 5h, la phase de diagnostic  $\varphi_3$  avait une durée de 0,65h, la nouvelle valeur consécutive à l'application des variables représentatives de la nouvelle stratégie est :  $t'\varphi_3 = (0,65 \times 66,7\%) + 0,067 = 0,5$  h.

Classe	Phase	Type e						Type i						Type m						
		$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\varphi_5$	$\varphi_6$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\varphi_5$	$\varphi_6$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\varphi_5$	$\varphi_6$	
Classe 1	k	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0->1h	C																			
Classe 2	k	100	100	100	100	100	100	100	100	42	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
1h->2h	C									0,486										
Classe 3	k	100	16,7		100	70	100	100	16,7		53,3	70	100	100	100	13	100	10	62	100
2h->10h	C		0,167			0,303			0,167	1		0,143			5h->15h	0,159			1,52	
Classe 4	k	100	100			75	33,3	100	100			75	33,3	100	100	100		75	33,3	
10h->20h	C		-0,25	1	2		0,167		-0,25	1	2		0,167	15h->30h	-0,25		2		0,167	
Classe 5	k	100	100	100		75	100	100	100			75	100	100	100	100		75	100	
20h-> $\infty$	C		-0,25	-0,9	2		-0,5		-0,25	-0,9	2		-0,5	30h-> $\infty$	-0,25		2		-0,5	

Tableau 3. Modification des règles induites par le changement de stratégie

Les P échantillons sont modifiés en fonction des nouveaux paramètres de la stratégie de maintenance. La comparaison entre les formes de distribution initiale et finale peut être effectuée pour chaque phase ou globalement. Nous montrons sur la figure 7, tirée des tableaux 3 et 4, la variation de la durée de la phase de diagnostic  $\varphi_3$  en fonction du temps de réparation pour une intervention électrique.

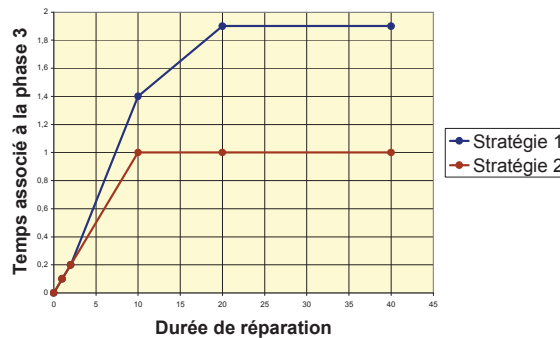
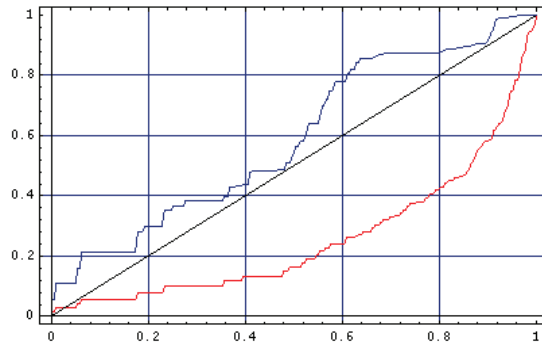


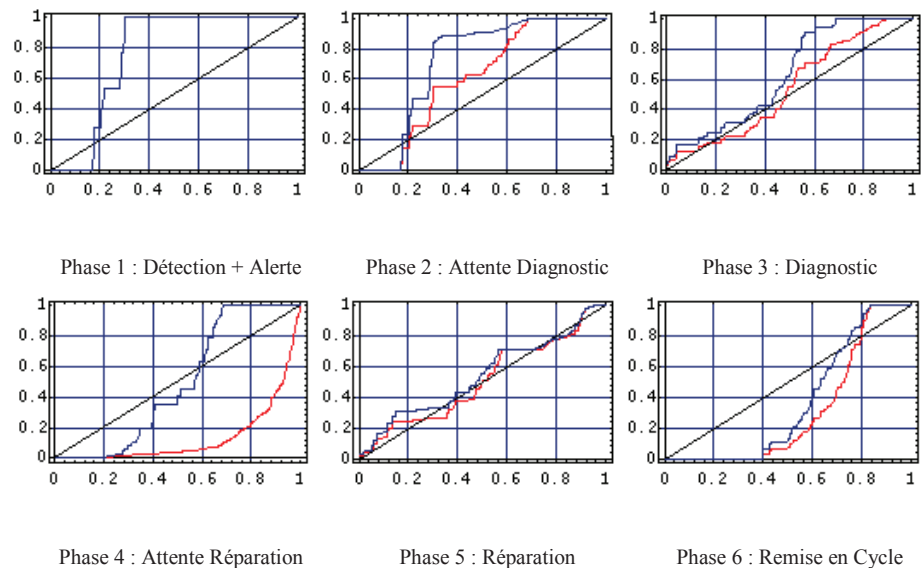
Figure 7. Durée de  $\varphi_3$  selon la stratégie de maintenance

Les distributions des valeurs brutes et modifiées du processus complet et de chacune de ses phases peuvent être comparées. Elles sont représentées sur les figures 8 et 9. Les courbes correspondant à l'échantillon modifié sont en noir, les distributions des temps de phases élémentaires de l'échantillon de départ sont en gris.



**Figure 8.** *Distribution du temps de réparation*

D'importantes modifications sont apparues sur les distributions du processus complet et de chacune de ses phases  $\varphi_i$ . Globalement, les taux de hasard, croissants dans la configuration de départ, tendent maintenant vers une valeur constante, voire une décroissance (comportement hypo-exponentiel).



**Figure 9.** *Distributions des phases du processus*

Les temps élémentaires  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_6$  (détection + alerte, attente diagnostic et remise en cycle) qui influent très peu sur la durée totale de la réparation sont peu modifiés. La réparation directe (phase  $\varphi_5$ ) conserve, après application de la nouvelle stratégie, un comportement plutôt exponentiel (taux sensiblement constant).

## 8. Conclusion

Nous avons présenté dans cet article une méthode d'évaluation de stratégies de maintenance à partir de l'analyse de données événementielles.

Après avoir rappelé les différentes étapes de traitement des données événementielles, nous avons illustré celles-ci sur un cas type à partir d'un échantillon industriel représentatif de temps de réparation d'une cellule d'usinage. L'application de tests d'exponentialité a mis en évidence des dispersions marquées des temps de réparation et des particularités liées au type de défaillance.

Nous avons fait apparaître ensuite, par décomposition des processus correctif et préventif, les phases élémentaires constitutives du temps global d'immobilisation. Par l'établissement de règles logiques de décomposition, nous avons montré comment reconstituer « artificiellement » certaines informations manquantes pour attribuer, à chaque phase, la durée élémentaire qui lui est affectée.

La prise en compte sur la durée des phases élémentaires des effets de l'évolution de la stratégie a permis de construire de nouveaux échantillons faisant office d'indicateurs de performance. Il est possible d'évaluer l'impact de ces modifications sur le processus global et d'orienter les choix stratégiques de maintenance.

Bien sûr, la lecture des commentaires sur l'exemple proposé doit tenir compte du caractère arbitraire de la situation décrite, arbitraire découlant d'une restitution d'expertise et non de relevés expérimentaux.

Le principe d'analyse que nous avons proposé conserve cependant toute sa valeur. Notre démonstration devrait contribuer à l'apport des moyens nouveaux pour l'évaluation et la mise en place des stratégies de maintenance des systèmes industriels d'aujourd'hui.

## 9. Bibliographie

- Albin S.L., Seng C., "Preventive replacement in systems with dependent components", *IEEE Transactions on Reliability*, 41, (2), 1992, p. 230-238.
- Barbera F., Schneider H., Kelle P., "A condition-based maintenance model with exponential failures and fixed inspection intervals", *Journal of the Operational Research Society*, 47, (8), 1996, p. 1037-1045.
- Barlow R.E., Proschan F., "Total Time on Test processes and applications to failure data analysis", *Reliability and Fault Tree Analysis*, Philadelphia, 1975.

- Becker A., Naïm P., *Les réseaux bayésiens*, Eyrolles, 1999.
- Bee D.D., Pickrell B.D., Bea R.G., Roberts K.R., Williamson R.B., "Safety Management Assessment System (SMAS): a process for identifying and evaluating human and organization factors in marine system operations with field test results", *Reliability Engineering & System Safety*, 65,(2), 1999, p. 125-140.
- Chandler A.D. Jr., *Stratégies et structures de l'entreprise*, Editions d'organisation, Paris, 1989.
- Cheng K., Zhang Y.L., "Analysis for a consecutive-k-out-of-n: repairable system with priority in repair", *International Journal of Systems Science*, 32, (5), 2001, p. 591-598.
- Christer A.H., "Developments in delay time analysis for modelling plant maintenance", *Journal of the Operational Research Society*, 50, (11), 1999, p. 1120-1137.
- Coetzee I.L., "The role of nhpp models in the practical analysis of maintenance failure data", *Reliability Engineering & System Safety*, 56, (2), 1997, p. 161-168.
- Dedopoulos I.T., Smeers Y., "An age reduction approach for finite horizon optimization of preventive maintenance for single units subject to random failures", *Computers & Industrial Engineering*, 34, (3), 1998, p. 643-654.
- Gouriveau R., Noyes D., « Formulation d'expertise en gestion des risques », *Pentom 2003 - Performance et Nouvelles Technologies en Maintenance*, Valenciennes, 27-29 mars 2003, p. 303-314.
- Gupta Y.P., Shubhag C., "Strategies of replacement under Markov renewal process", *International Journal of Information and Management Sciences*, 4, (1), 1993, p. 41-50.
- Hagin A.A., "Reliability evaluation of a repairable network with limited capacity and structural redundancy", *Microelectronics & Reliability*, 37, (2), 1997, p.341-347.
- Haken B., "Design: the path to success or failure?", *Electronic Engineering*, 70, (858), 77, 1998.
- Haugen K., Hokstad P., Sandtorv H., "The analysis of failure data in the presence of critical and degraded failures", *Reliability Engineering & System Safety*, 58, (2), 1997, p. 97-107.
- Hontelez J.A.M., Burger H.H., Wijnmalen D.J.D., "Optimum condition-based maintenance policies for deteriorating systems with partial information", *Reliability Engineering & System Safety*, 51, (3), 1996, p. 267-274.
- Hopp W. J., Kuo Y.L., "An optimal structured policy for maintenance of partially observable aircraft engine components", *Naval Research Logistics*, 45, (4), 1998, p. 335-352.
- Iravani S.M.R., Duenyas I., Olsen T.L., "A production/inventory system subject to failure with limited repair capacity", *Operations Research*, 48, (6), 2000, p. 951-964.
- Kapur P. K., Bhalla V. K., "Optimum maintenance policies maximizing service reliability", *International journal of systems science*, 21, (1), 1990, p. 217-224.
- Levitin G., Lisnianski A., Ben-Haim H., Elmakis D., "Redundancy optimization for series-parallel multi state systems", *IEEE Transactions on Reliability*, 47, (2), 1998, p. 165-172.

- Liu H.M., "Reliability of a load-sharing k-out-of-n: G system: Non-iid components with arbitrary distributions", *IEEE Transactions on Reliability*, 47, (3 Part 1), 1998, p. 279-284.
- Makis V., "Optimal control policy for a tool-wear process subject to shocks and random failures", *International Journal of Production Economics*, 60-1, 1999, p. 613-621.
- Moss B., "Failure by design", *New Scientist*, 162, (2184), 1999 p. 59.
- Noyes D., Pérès F., « Stratégies de maintenance et variables d'influence dans les systèmes de production », *10<sup>e</sup> Colloque National de Fiabilité et de Maintenabilité*, Saint Malo, 1<sup>er</sup>-3 octobre 1996, p. 627-636.
- Ohnishi M., Morioka T., Ibaraki T., "Optimal minimal-repair and replacement problem of discrete-time markovian deterioration system under incomplete state information", *Computers & Industrial Engineering*, 27, (1-4), 1994, p. 409-412.
- Papazoglou I.A., "Bayesian decision analysis and reliability certification", *Reliability Engineering & System Safety*, 66, (2), 1999, p. 177-198.
- Paté-Cornell M.E., Lee H.L., Tagaras G., "Warnings of malfunction: the decision to inspect and maintain production processes on schedule or on demand", *Management Science*, 33, (10), 1987, p. 1277-1290.
- Pellegrin C., "Choice of a periodic on-condition maintenance policy", *International Journal of Production Research*, 30, (5), 1992, p. 1153-1173.
- Pérès F., Outils d'analyse de performance pour stratégies de maintenance dans les systèmes de production, Thèse de doctorat, Bordeaux 1, 1996.
- Pérès F., Noyes D., "Evaluation of a maintenance strategy by the analysis of the rate of repair", *Revue Quality and Reliability Engineering International*, (QREI), Wiley InterScience Editor, 2003, vol. 19-2, p. 129-148.
- Salameh M.K., Jaber M.Y., "Optimal lot sizing with regular maintenance interruptions", *Applied Mathematical Modelling*, 21, (2), 1997, p. 85-90.
- Sherwin D. J., "Inspect or monitor?", *Engineering Cost and Production Economics*, 18, (3), 1990, p. 223-231.
- Sheu S.R., Jhang J.P., "Optimal age and block replacement policies for a multi-component system with a shock type failure interaction", *International Journal of Systems Science*, 29, (8), 1998, p. 805-817.
- Siddiqui S.A., Mishra S., "Reliability analysis of a finite range failure model", *Microelectronics & Reliability*, 35, (5), 1995, p. 859-862.
- Sridharan V., Mohanavadivu P., "Some statistical characteristics of a repairable, standby, human & machine system", *IEEE Transactions on Reliability*, 47, (4), 1998, p. 431-435.
- Tarondeau J.C., Lorino P., "De la stratégie aux processus stratégiques", *Revue Française de Gestion*, 1998, n° 117, p. 5-17.
- Thiétart R.A., Martinet A.C., « Posture paradigmatique et recherche en management stratégique », *Stratégies – Actualités et futurs de la recherche*, Vuibert, 2001.



- Tseng S.T., "Optimal preventive maintenance policy for deteriorating production systems", *IIE Transactions*, 28, (8), 1996, p. 687-694.
- Valdez-Flores C., Fedman R.M., "A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-units systems", *Naval Research Logistics*, 36, (4), 1989, p. 419-445.
- Vanderperre E.L., Makhanov S.S., Suchatvejapoom S., "Long-run availability of a reparable parallel system", *Microelectronics & Reliability*, 37, (3), 1997, p. 525-527.
- Vaurio J.K., "On time-dependent availability and maintenance optimization of standby units under various maintenance policies", *Reliability Engineering & System Safety*, 56, (1), 1997, p. 79-89.
- Wagner L.M., "Comparing maintenance approaches for tokamak fusion power plants", *Fusion Technology*, 39, (2 Part 2), 2001, p. 458-461.
- Wang K.H., Lee H.C., "Cost-analysis of the cold-standby M/M/R machine repair problem with multiple modes of failure", *Microelectronics & Reliability*, 38, (3), 1998, p. 435-441.