

Disponibilité de la chaufferie au niveau de l'entreprise des corps gras de Béjaïa COGB

Anzi A., Touche N., Aïssani D. et Bouraine M.

lamos_bejaia@hotmail.com, anzi_aicha@yahoo.fr

Résumé L'importance des coûts pouvant résulter d'un arrêt accidentel des lignes de production a donné un grand élan aux études de fiabilité et de disponibilité des systèmes de production. C'est l'une des raisons qui avait conduit les responsables de l'entreprise COGB (Corps gras de Béjaïa) à déterminer la disponibilité de la chaufferie en se basant sur le calcul de la fiabilité et de la maintenabilité de ses équipements (cf. Mémoire de F. Acheuk et M. Hassaim, 2004). Les mesures prises suite à cette première étude (Nouvelles méthodes de travail, changement de pièces,...) ont conduit à la modification du système initial. L'objectif de notre travail est d'apprécier l'état actuel de la chaufferie de l'entreprise COGB en évaluant la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité de ses équipements. Pour ce faire, des modèles de prévisions du nombre de pannes des équipements ont été élaborés en utilisant la méthode de lissage exponentiel de Winters et la méthode de Box et Jenkins. Puis, les lois paramétriques et non paramétriques ont été utilisées dans le but de modéliser le comportement des équipements. Enfin, la maintenabilité a été modélisée en utilisant les lois paramétriques, et le fonctionnement des réseaux étudiés a été modélisé par les chaînes de Markov afin de déterminer leurs disponibilités.

Mots Clés : *Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité, Prévisions, Lois et tests non paramétriques.*

1. INTRODUCTION

Dans un contexte de "juste-à-temps", les arrêts accidentels d'un système de production sont considérés comme une source de perturbation et de perte de productivité. La disponibilité des équipements, au moment voulu, est une condition nécessaire au bon déroulement de la production et au respect des délais de livraison.

Les entreprises réalisent aujourd'hui que les coûts liés aux arrêts accidentels des équipements affectent directement leur rentabilité. Le choix s'impose d'utiliser ces équipements au maximum et à cette fin, les entreprises se doivent d'en étudier l'aspect de fiabilité et de disponibilité. Rappelons que la fiabilité d'un équipement donné, est une caractéristique exprimée par la probabilité qu'il accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données et pendant une période donnée. La disponibilité représente la proportion du temps de bon fonctionnement de l'équipement.

C'est en 1998 que les responsables de l'entreprise COGB ont pris conscience de l'importance de l'application des méthodes de la fiabilité et de la disponibilité. En effet, un accident tragique s'est produit. Une explosion d'une chaudière de la chaufferie de l'entreprise a engendré des pertes humaines et matérielles considérables.

C'est dans ce contexte qu'une étude avait été initiée au sein de l'entreprise [1]. Elle consistait à déterminer la disponibilité de la chaufferie en se basant sur le calcul de la fiabilité ainsi que la maintenabilité de ses équipements. Les résultats obtenus ont révélé que la majorité des équipements étudiés étaient dans leur période de jeunesse avec un taux de défaillance décroissant.

Ceci n'était pas le cas de la pompe doseuse (58F3001) qui présentait un taux de défaillance croissant, donc avait entamé sa période de vieillesse. Ce qui suggèrait l'application d'une politique de maintenance adéquate. Concernant la disponibilité, celle-ci avait été calculée pour deux réseaux de la chaufferie, à savoir le réseau de fabrication de la vapeur et le réseau de fabrication de l'air comprimé. Les valeurs obtenues avaient montré que ces réseaux ont une disponibilité très élevée. Ceci signifie que la chaufferie était prête à fabriquer de la vapeur et de l'air comprimé à tout moment.

Suite à ces résultats, l'entreprise COGB a mis sur pied un programme concernant les méthodes de travail. Il s'agit plus précisément de la gestion des équipements de la chaufferie, notamment ceux montés en redondance passive. De plus, l'entreprise a procédé au remplacement de la pompe doseuse (58F3001).

2. FONCTIONNEMENT DE LA CHAUFFERIE

L'atelier chaufferie a un rôle fondamental dans le complexe COGB. Il alimente les différents ateliers en vapeur, en eau traitée et en air comprimé. Il est doté d'un bassin de stockage de l'eau de capacité $1000m^3$ qui se trouve à l'intérieur du complexe ; cette eau est utilisée pour la fabrication de la vapeur, la fabrication de l'eau adoucie et osmosée.

La production de la vapeur passe par les trois étapes suivantes :

- Production de l'eau décarbonatée ;
- Production de l'eau de la bêche alimentaire ;
- Fabrication de la vapeur par les chaudières.

La fabrication de l'eau adoucie se fait à l'aide des adoucisseurs pour une déminéralisation partielle ; cette eau adoucie est utilisée pour :

- Produire de l'eau osmosée ;
- Produire de l'eau procédée ;
- Refroidir les équipements ;

L'eau osmosée se fabrique à l'aide des osmoseurs, qui fonctionnent en Redondance passive.

3. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES

3.1 Collecte des données

Dans ce travail, nous complétons la collecte réalisée dans [1]. Nous avons considéré les données pour la période allant du 09/01/04 au 31/03/06.

Lors de la collecte, nous avons consulté plusieurs sources :

- ▶ Demandes de travail au niveau du service méthodes.
- ▶ Registres du suivi du fonctionnement des chaudières au niveau du service utilités.
- ▶ Registre du suivi des opérations de maintenance au niveau du service maintenance.

Ces sources ne sont disponibles que pour la période du 01/01/04 au 31/03/06. Pour la période allant du 09/01/1999 au 01/01/04, nous avons utilisé les données déjà collectées dans [1].

Les informations collectées concernent :

- Les instants de défaillance des équipements.
- Les dates de remise en service.
- Les durées d'intervention (réparation).
- Les coûts d'intervention en Homme/heure.

4. CHOIX DES EQUIPEMENTS A ETUDIER

Vu le nombre des équipements de la chaufferie, l'étude statistique de chacun d'entre eux se révélera longue. Afin de déterminer les éléments critiques, on a effectué une analyse ABC en se basant sur le nombre de pannes, ainsi que les coûts d'arrêt (en Homme/heure) engendrés par chaque équipement.

Le graphe de Pareto associé est présenté dans la figure suivant :

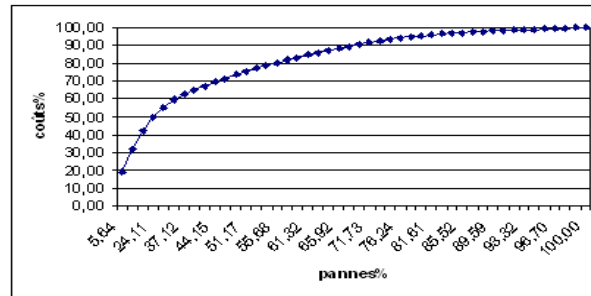


FIGURE 6.1. Courbe de Pareto

L'analyse effectuée a révélé que 38,77% des pannes sont à l'origine de 65,06% des coûts d'arrêt. Elle nous a permis également de ressortir les équipements critiques de la chaufferie et qui sont donnés dans le tableau suivant :

Code	Désignation
6651001	Compresseur N°01
6651002	Compresseur N°02
4500001	Chaudière EMK
4501001	Chaudière Bono
4502001	Chaudière Babcock
58S3001	Pompe alimentaire
5842001	Pompe doseuse
2368001	Collecteur de vapeur

TABLE 6.1. Les équipements de la zone A de Pareto

5. PREVISIONS

Les équipements ressortis dans l'analyse de Pareto sont les plus coûteux en terme de maintenance. Afin de prévoir l'évolution du nombre de pannes de ces équipements, nous avons effectué une étude prévisionnelle en utilisant deux méthodes de modélisation :

- La méthode de lissage exponentiel.

- La méthode de Box et Jenkins.

Pour cela, on a considéré la série d’observations trimestrielles représentant le nombre de pannes enregistrées pour la période allant de 1999 à 2006 ; et dont le graphe est donné par la figure 2.

Année	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4
1999	9	7	14	15
2000	6	21	19	20
2001	17	14	7	17
2002	14	9	26	26
2003	15	17	27	21
2004	13	10	20	21
2005	14	15	17	4
2006	19			

TABLE 6.2. Nombre de pannes des équipements durant la période 1999-2006

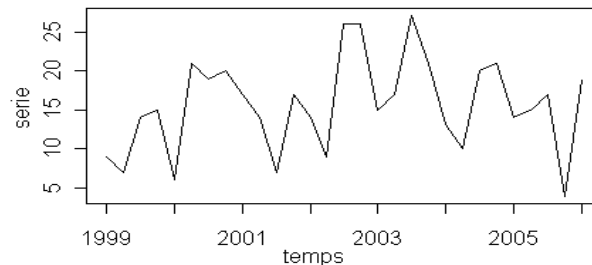


FIGURE 6.2. Graphe de la série originale

a) Modélisation par le lissage exponentiel

Cette série a été modélisée par le modèle multiplicatif de Winters. Les prévisions pour les trois autres trimestres de l’année 2006 ainsi que les quatre trimestres des années 2007 et 2008 sont obtenues par la relation :

$$\hat{Y}_T(k) = [\hat{a}_0(T) + k\hat{a}_1(T)]\hat{S}_{T+k}$$

et sont données dans le tableau suivant :

Année	$\hat{Y}_{trimestre1}$	$\hat{Y}_{trimestre2}$	$\hat{Y}_{trimestre3}$	$\hat{Y}_{trimestre4}$
2006		13.25	17.96	10.48
2007	17.28	13.25	17.96	10.48
2008	17.28	13.25	17.96	10.48

TABLE 6.3. Prévisions obtenues par le lissage multiplicatif de Winters

b) Modélisation par Box et Jenkins

Le modèle de prévision retenu pour cette série est un SARIMA(0,1,1)(1,1,0) qui s’écrit sous la forme suivante :

$$Z_t = Z_{t-1} + 0,5171Z_{t-4} - 0,5171Z_{t-5} + 0,4829Z_{t-8} + 0,4829Z_{t-9} + 0,8412\epsilon_{t-1} + \epsilon_t$$

Les prévisions pour les trois autres trimestres de l'année 2006 ainsi que les quatre trimestres des années 2007 et 2008 sont données dans le tableau et la figure suivants :

Année	$\hat{Y}_{trimestre1}$	$\hat{Y}_{trimestre2}$	$\hat{Y}_{trimestre3}$	$\hat{Y}_{trimestre4}$
2006		10,58	16,44	10,20
2007	14,58	10,71	14,70	5,20
2008	14,71	8,64	13,54	5,61

TABLE 6.4. Prévisions obtenues par le modèle de Box-Jenkins

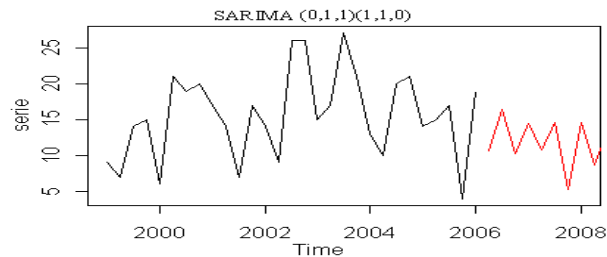


FIGURE 6.3. Série originale et prévisions

Les résultats de la modélisation montrent une légère diminution du nombre de pannes des équipements. Pour mieux connaître le comportement de ces équipements, nous allons effectuer dans ce qui suit l'étude de leur fiabilité.

6. MDELISATION PARAMETRIQUE DE LOIS DE FIABILITE

La modélisation paramétrique de la fiabilité des équipements a été faite avec le logiciel STATISTICA, qui permet d'ajuster avec les lois paramétriques et d'estimer les paramètres avec l'estimateur du maximum de vraisemblance. Les modèles obtenus ont été validés par les deux tests : K-S et le test du Khi-deux, à l'exception des modèles des trois équipements (pompe alimentaire 58S3001, collecteur de vapeur 2368001 et pompe doseuse 5842001), pour lesquels nous n'avons pu utiliser que le test de K-S, et ce, en raison de la taille des échantillons, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

équipement	n	loi ajustée	paramètres de la loi	K.S		Chi2	
				D_n	D(n,0.05)	E	e
6651001	64	exponentielle	$\lambda = 1/998, 326$	0,206	0,162	5,568	5,99 $dl = 2$
		Weibull	$\beta = 0, 704, \eta = 789, 933$	0,082		0,821	14,07 $dl = 7$
6651002	51	exponentielle	$\lambda = 1/1698, 581$	0,271	0,182	5,26	5,99 $dl = 2$
		Weibull	$\beta = 0, 621, \eta = 1134, 115$	0,093		0,185	14,07 $dl = 7$
4500001	80	exponentielle	$\lambda = 1/797, 0, 79$	0,157	0,146	7,33	7,81 $dl = 3$
		Weibull	$\beta = 0, 785, \eta = 686, 214$	0,082		0,847	9,49 $dl = 4$
4501001	78	exponentielle	$\lambda = 1/823, 756$	0,135	0,147	3,33	7,81 $dl = 3$
		Weibull	$\beta = 0, 823, \eta = 728, 248$	0,110		0,78	14,07 $dl = 7$
4502001	81	exponentielle	$\lambda = 1/522, 317$	0,147	0,144	3,97	5,99 $dl = 2$
		Weibull	$\beta = 0, 939, \eta = 505, 56$	0,126		0,442	9,49 $dl = 4$
58S3001	29	exponentielle	$\lambda = 1/1831, 252$	0,147	0,241	-	-
		Weibull	$\beta = 0, 616, \eta = 893$	0,225		-	-
5842001	39	exponentielle	$\lambda = 1/1422, 29$	0,138	0,208	2,41	3,84 $dl = 1$
		Weibull	$\beta = 0, 767, \eta = 1207, 845$	0,099		1,258	11,07 $dl = 5$
2368001	18	exponentielle	$\lambda = 1/2443, 722$	0,304	0,306	-	-
		Weibull	$\beta = 0, 675, \eta = 1715, 638$	0,158		-	-
5842002	16	exponentielle	$\lambda = 1/2725, 58$	0,141	0,325	-	-
		Weibull	$\beta = 1, 045, \eta = 2778, 419$	0,156		-	-

TABLE 6.5. Résultats de l'ajustement des temps de bon fonctionnement

- D_n : Statistique empirique du test de Kolmogorov-Smirnov.
- $D_{(n,0.05)}$: Statistique tabulée du test de Kolmogorov-Smirnov avec le seuil de signification 0.05.
- E : Valeur théorique de la statistique de Pearson.
- e : Valeur tabulée de la statistique de Pearson.

7. MODELISATION NON PARAMETRIQUE

7.1 Test graphique

Pour ce test, nous avons utilisé le logiciel EXCEL, qui permet de représenter le nuage de points $(\frac{i}{r}, \frac{S(t_i)}{S(t_r)})$ en traçant la courbe de tendance tout en donnant le coefficient de détermination associé R^2 , et ce, selon plusieurs modèles (exponentiel, puissance, linéaire, . . .). Le meilleur modèle sera celui ayant le coefficient de détermination R^2 le plus élevé, les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Pour confirmer les résultats de la modélisation paramétrique ainsi que ceux du test graphique pour les équipements dont les paramètres de forme β sont respectivement ($\beta_1 = 0, 785, \beta_2 =$

Equipement	Figure	Allure	Modèle
6651001	Fig(4.19)	Convexe	DFR
6651002	Fig(4.18)	Convexe	DFR
4500001	Fig(4.16)	Convexe	DFR
4501001	Fig(4.14)	Droite	Exponentiel
4502001	Fig(4.15)	Droite	Exponentiel
58S3001	Fig(4.17)	Convexe	DFR
5842001	Fig(4.21)	Convexe	DFR
2368001	Fig(4.9)	Convexe	DFR
5842002	Fig(4.20)	Droite	Exponentiel

TABLE 6.6. Résultats du test graphique

0,823, $\beta_3 = 0,939$, $\beta_4 = 1,045$), on a jugé utile d'appliquer un autre test non paramétrique.

7.2 Test A_2 de Klefsjö

Pour ce test, nous avons réalisé une application avec le logiciel EXCEL et les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Equipement	n	Statistique du test $A_2\sqrt{7560/n^7}$	intervalle d'acceptation de $H_0(0,05)$	Modèle
4500001	79	-3,340] - 1,736; 1,736[DFR
4501001	78	-1,202] - 1,736; 1,736[Exp
4502001	81	-1,129] - 1,96; 1,96[Exp
5842002	16	-0,869] - 2,133; 2,133[Exp

TABLE 6.7. Résultats du test A_2 de Klefsjö

7.3 Interprétation des résultats

A partir des résultats précédents, on peut distinguer deux catégories d'équipements :

- Une majorité d'équipements qui présentent un paramètre de forme β inférieur à 1. Ils sont donc caractérisés par un taux de défaillance décroissant. Ceci signifie qu'ils présentent une proportion élevée de défaillances précoces, ce qui pourrait s'expliquer par :
 - Les défauts de conception et de fabrication.
 - La mauvaise utilisation et réparation des équipements.
 - La redondance.
 - Les arrêts de production pendant de longues périodes.
- La deuxième catégorie concerne les équipements (chaudière 4501001, chaudière 4502001, pompe 5842002) qui présentent un paramètre de forme β proche de 1. Ils sont donc caractérisés par un taux de défaillance constant, ce qui montre qu'ils ont entamé leur période de vie utile où les défaillances sont beaucoup plus aléatoires.

Pour comparer la fiabilité de ces équipements, nous avons utilisé les temps moyens de bon

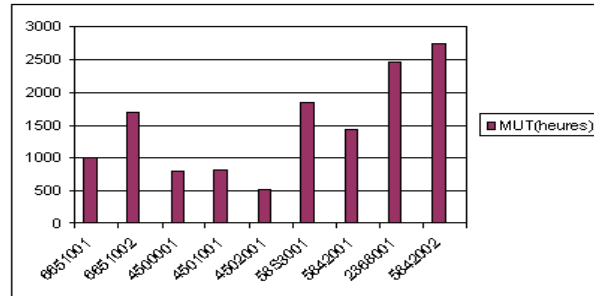


FIGURE 6.4. Temps moyen de bon fonctionnement

fonctionnement (MUT). Ainsi, on dira qu’un équipement est en moyenne plus fiable qu’un autre si son MUT est supérieur.

A partir du diagramme de la figure (6.4), on conclut que :

- Les chaudières sont les moins fiables, cela est dû au fait que celles-ci soient constituées de plusieurs composants (sous-équipements) dont les pannes influent indépendamment sur le MUT de la chaudière.
- Les trois pompes ainsi que le collecteur de vapeur sont en moyenne les plus fiables que le reste des équipements étudiés.

Équipement	n	Loi ajustée	Paramètres	MUT
6651001	64	Weibull	$\beta = 0,704, \eta = 789,933$	998,326
6651002	51	Weibull	$\beta = 0,621, \eta = 1134,115$	1698,581
4500001	80	Weibull	$\beta = 0,785, \eta = 686,214$	797,079
4501001	78	Exponentielle	$\lambda = 1/823,756$	823,756
4502001	81	Exponentielle	$\lambda = 1/522,317$	522,317
58S3001	29	Weibull	$\beta = 0,616, \eta = 893$	1831,252
5842001	39	Weibull	$\beta = 0,767, \eta = 1207,845$	1422,29
2368001	18	Weibull	$\beta = 0,675, \eta = 1715,638$	2443,722
5842002	16	Exponentielle	$\lambda = 1/2725,58$	2725,58

TABLE 6.8. Résultats du calcul des MUT

Discussion

Compte tenu de ces résultats et en examinant les résultats obtenus dans [1], on remarque que d’autres équipements critiques sont apparus (la pompe alimentaire 58S3001 et le collecteur de vapeur 2368001), alors que certains autres ont disparu (les pompes doseuses 584F2001 et 58F4001) de l’analyse ABC. Ceci est dû au fait qu’ils soient remplacés par d’autres éléments (comme le cas de la pompe 58F3001) ou qu’ils soient bien maintenus.

Pour les équipements apparus dans les deux études, une légère différence a été constatée au niveau de leurs temps moyens de bon fonctionnement (MUT).

8. MODELISATION DE LA MAINTENABILITE

Pour la modélisation de la maintenabilité, nous avons utilisé les durées d'intervention qui représentent les temps de réparation des pannes (TTR). Pour la validation des modèles ajustant ces lois de maintenabilité avec le logiciel STATISTICA, nous avons utilisé les deux tests ; le test de Kolmogorov-Smirnov et celui du Khi-Deux, sauf pour les modèles des trois équipements (la pompe alimentaire 58S3001, le collecteur de vapeur 2368001 et la pompe doseuse 5842002). Ceux-ci ont été validés uniquement par le test de Kolmogorov-Smirnov, la taille des échantillons étant petite. Le tableau suivant résume les résultats de la modélisation.

équipement	n	loi ajustée	paramètres de la loi	K.S		Chi2	
				d_n	d(n,0.05)	E	e
6651001	65	exponentielle	$\lambda = 1/4, 186$	0,2	0,161	4,316	5,99 dl = 2
		Log-normal	$\mu = 0,808, \sigma = 1,08$	0,111		6,08	3,84 dl = 1
6651002	52	exponentielle	$\lambda = 1/3, 422$	0,146	0,18	5,588	5,99 dl = 2
		Log-normal	$\mu = 0,639, \sigma = 1,206$	0,153		5,46	3,84 dl = 1
4500001	81	Gamma	$\alpha = 0,653, \beta = 3,414$	0,135	0,144	13,13	9,49 dl = 4
4501001	79	exponentielle	$\lambda = 1/2, 822$	0,249	0,183 (0,01)	13,07	15,09 dl = 5 (0,01)
		Log-normal	$\mu = 0,777, \sigma = 0,706$	1,161	0,146	5,44	7,81 dl = 3
4502001	82	exponentielle	$\lambda = 1/3, 826$	0,144	0,143	3,21	3,84 dl = 1
		Log-normal	$\mu = 0,849, \sigma = 0,914$	0,116		7,154	9,49 dl = 4
58S3001	30	exponentielle	$\lambda = 1/2, 598$	0,294	0,237	2,03	3,84 dl = 1
		Log-normal	$\mu = 0,144, \sigma = 1,209$	0,148		-	-
5842001	40	exponentielle	$\lambda = 1/1, 692$	0,171	0,2	2,914	7,81 dl = 3
		Log-normal	$\mu = 0,101, \sigma = 0,944$	0,182		1,214	5,99 dl = 2
2368001	19	exponentielle	$\lambda = 1/2, 842$	0,243	0,298	0,731	3,84 dl = 1
		Log-normal	$\mu = 0,734, \sigma = 0,799$	0,189		-	-
5842002	17	exponentielle	$\lambda = 1/1, 397$	0,242	0,318	0,255	3,84 dl = 1
		Log-normal	$\mu = 0,083, \sigma = 0,746$	0,161		-	-

TABLE 6.9. Résultats de l'ajustement des temps de réparation

8.1 Interprétation des résultats

D'après les résultats de la modélisation de maintenabilité, on remarque que :

- Pour l'équipement (chaudière EMK 4500001) sa loi de maintenabilité s'ajuste par la loi gamma à deux paramètres.
- Pour le reste des équipements, les lois de maintenabilité s'ajustent par deux lois ; la loi exponentielle et la loi log-normale avec une moyenne des temps de réparation très petite pour cette dernière, en raison de la nature des pannes et des réparations des équipements.

9. ETUDE DE LA DISPONIBILITE

Dans cette partie, nous allons étudier la disponibilité de la chaufferie (réseau de production de la vapeur et celui de l'air comprimé). Pour cela, nous posons la fiabilité des équipements autres

que ceux étudiés égale à 1.

L'analyse statistique effectuée précédemment a permis d'ajuster les lois de fiabilité des équipements par les lois Weibull et Exponentielle. On prend pour le calcul de la disponibilité la loi exponentielle, car les résultats analytiques sont applicables dans ce cas.

Les lois de maintenabilité, quant à elles, sont ajustées par les lois Log-normale et Exponentielle, à l'exception de la loi de l'équipement (chaudière EMK 4500001) qui n'est ajustée que par la loi gamma. Pour cela, nous allons approximer la loi de cet équipement par une loi exponentielle à l'aide du MTE potentiels [2].

Le tableau suivant résume les résultats de l'ajustement des lois de fiabilité et de maintenabilité des équipements.

Equipements	Fiabilité			Mintenabilité		
	n	Loi ajustée	Paramètres	n	Loi ajustée	Paramètres
6651001	64	exponentielle	$\lambda = 1/998,326$	65	exponentielle	$\lambda = 1/4,186$
6651002	51	exponentielle	$\lambda = 1/1698,581$	52	exponentielle	$\lambda = 1/3,422$
4500001	80	exponentielle	$\lambda = 1/797,079$	81	gamma	$\alpha = 0,653, \beta = 3,414$
4501001	78	exponentielle	$\lambda = 1/823,756$	79	exponentielle	$\lambda = 1/2,822$
4502001	81	exponentielle	$\lambda = 1/522,317$	82	exponentielle	$\lambda = 1/3,826$
58S3001	29	exponentielle	$\lambda = 1/1831,252$	30	exponentielle	$\lambda = 1/2,598$
5842001	39	exponentielle	$\lambda = 1/1422,29$	40	exponentielle	$\lambda = 1/1,692$
2368001	18	exponentielle	$\lambda = 1/2443,722$	19	exponentielle	$\lambda = 1/2,842$
5842002	16	exponentielle	$\lambda = 1/2725,58$	17	exponentielle	$\lambda = 1/1,397$

TABLE 6.10. Résultats de l'ajustement des lois de fiabilité et de maintenabilité

9.1 Description des réseaux étudiés

La chaufferie se compose de trois réseaux :

- Réseau de fabrication de la vapeur.
- Réseau de fabrication de l'eau osmosée.
- Réseau de fabrication de l'air comprimé.

Les équipements ressortis dans l'analyse ABC appartiennent au réseau de fabrication de la vapeur et au réseau de fabrication de l'air comprimé. Donc, pour l'étude de la disponibilité, nous allons considérer uniquement ces deux réseaux.

Réseau de fabrication de l'air comprimé : Il est composé de deux pompes doseuses, une pompe alimentaire, trois chaudières et un collecteur de vapeur qui sont disposés comme suit :

- Les trois chaudières sont montées en redondance passive, c'est à dire tant que deux chaudières de base fonctionnent la chaudière de réserve est à l'arrêt. Cette chaudière n'est mise en marche que lorsque une chaudière de base tombe en panne.
Un autre branchement en redondance passive peut être réalisé, c'est à dire tant qu'une chaudière de base fonctionne les deux chaudières de réserve sont à l'arrêt. Ces dernières ne sont mises en marche que lorsque la chaudière de base tombe en panne.
- Les deux pompes doseuses sont montées en redondance passive.

L'ensemble des équipements est monté en série.

Réseau de fabrication de l'air comprimé : Il est composé de deux compresseurs disposés en redondance passive, c'est à dire tant que le compresseur de base fonctionne le compresseur de réserve est à l'arrêt. Ce compresseur n'est mis en marche que lorsque le compresseur de base tombe en panne. Un autre branchement peut être réalisé, c'est à dire les deux compresseurs fonctionnent en même temps. Le système tombe en panne si les deux compresseurs tombent en panne.

9.2 Modélisation et Résolution

9.2.1 Réseau de fabrication de l'air comprimé

- Fonctionnement en régime normal

Le réseau associé est :

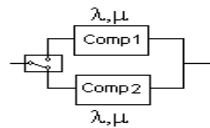


FIGURE 6.5. Fonctionnement des compresseurs en régime normal

• Modélisation

Les durées des pannes ainsi que les temps de réparation suivent des lois exponentielles de paramètres λ et μ respectivement. Soit X_t le nombre de compresseurs en panne à la date t . X_t est un processus à espace d'états discret.

Les états du système sont définis comme suit :

0 : les deux compresseurs sont en bon état, le système fonctionne.

1 : l'un des deux compresseurs est en bon état, l'autre est en panne. Le système fonctionne.

2 : les deux compresseurs sont en panne, le système ne fonctionne pas.

Graphe de transitions

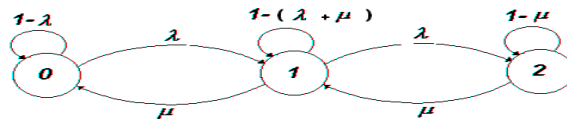


FIGURE 6.6. Graphe de transitions

Le graphe est irréductible. Le régime stationnaire existe, donc il existe un vecteur $\pi(\pi_0, \pi_1, \pi_2)$.

• Résolution

Pour le calcul du vecteur π , on a les équations d'états suivantes :

$$\lambda\pi_0 = \mu\pi_1$$

$$(\lambda + \mu)\pi_1 = \lambda\pi_0 + \mu\pi_2$$

$$\lambda\pi_1 = \mu\pi_2$$

Avec la condition de normalisation :

$$\pi_0 + \pi_1 + \pi_2 = 1$$

La résolution du système nous donne :

$$\pi_0 = \frac{\mu^2}{[\mu^2 + \mu\lambda + \lambda^2]}$$

$$\pi_1 = \frac{\lambda\mu}{[\mu^2 + \mu\lambda + \lambda^2]}$$

$$\pi_2 = \frac{\lambda^2}{[\mu^2 + \mu\lambda + \lambda^2]}$$

• Disponibilité

En régime normal, le système fonctionne si au moins un compresseur est en bon état. Donc la disponibilité se calcule de la manière suivante :

$$D_c = \pi_0 + \pi_1 = \frac{\mu^2 + \lambda\mu}{[\mu^2 + \mu\lambda + \lambda^2]}$$

- Fonctionnement en régime maximal

Le réseau associé :

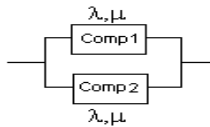


FIGURE 6.7. Fonctionnement des compresseurs en régime maximal

• Modélisation

Les états du système sont définis comme suit :

0 : les deux compresseurs sont en bon état, le système fonctionne.

1 : l'un des deux compresseurs est en bon état, l'autre est en panne. Le système ne fonctionne pas.

2 : les deux compresseurs sont en panne, le système ne fonctionne pas.

Graphe de transitions

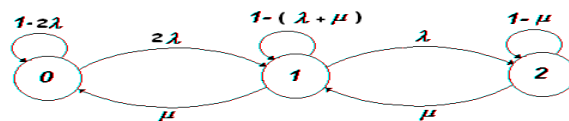


FIGURE 6.8. Graphe de transitions

• Résolution

Les équations d'états sont :

$$2\lambda\pi_0 = \mu\pi_1$$

$$(\lambda + \mu)\pi_1 = 2\lambda\pi_0 + \mu\pi_2$$

$$\lambda\pi_1 = \mu\pi_2; \text{ avec } \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 = 1$$

La résolution du système donne les résultats suivants :

$$\pi_0 = \frac{\mu^2}{[\mu^2 + 2\mu\lambda + 2\lambda^2]}$$

$$\pi_1 = \frac{2\lambda\mu}{[\mu^2 + 2\mu\lambda + 2\lambda^2]}$$

$$\pi_2 = \frac{2\lambda^2}{[\mu^2 + 2\mu\lambda + 2\lambda^2]}$$

• **Disponibilité**

En régime maximal, le système fonctionne si les deux compresseurs sont en bon état, d'où la disponibilité est :

$$D_c = \pi_0 = \frac{\mu^2}{[\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2]}$$

9.2.2 Réseau de fabrication de la vapeur

- *Fonctionnement en régime normal*

Le réseau associé :

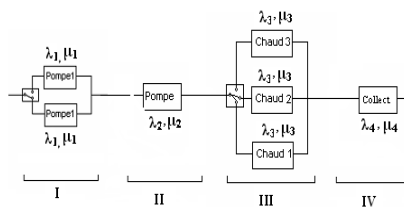


FIGURE 6.9. Fonctionnement en régime normal

Pour le calcul de la disponibilité du réseau, on calcule :

- la disponibilité des deux pompes doseuses montées en redondance passive :

• **Modélisation**

Les états sont :

- 0 : les deux pompes sont en bon état, le système fonctionne.
- 1 : l'une des deux pompes est en bon état, l'autre est en panne. Le système fonctionne.
- 2 : les deux pompes sont en panne, le système ne fonctionne pas.

Graphe de transitions

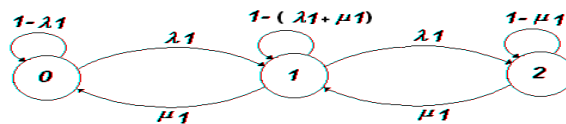


FIGURE 6.10. Graphe de transitions

• Résolution

Pour le calcul du vecteur π , on a les équations d'états :

$$\lambda_1 \pi_0 = \mu_1 \pi_1$$

$$(\lambda_1 + \mu_1) \pi_1 = \lambda_1 \pi_0 + \mu_1 \pi_2$$

$$\lambda_1 \pi_1 = \mu_1 \pi_2 ; \text{ avec } \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 = 1$$

La résolution du système donne les résultats suivants :

$$\pi_0 = \frac{\mu_1^2}{[\mu_1^2 + \mu_1 \lambda_1 + \lambda_1^2]}$$

$$\pi_1 = \frac{\lambda_1 \mu_1}{[\mu_1^2 + \mu_1 \lambda_1 + \lambda_1^2]}$$

$$\pi_2 = \frac{\lambda_1^2}{[\mu_1^2 + \mu_1 \lambda_1 + \lambda_1^2]}$$

• Disponibilité

Le système fonctionne si au moins une pompe est en bon état. Donc la disponibilité est donnée par :

$$D_I = \pi_0 + \pi_1 = \frac{\mu_1^2 + \lambda_1 \mu_1}{[\mu_1^2 + \mu_1 \lambda_1 + \lambda_1^2]}$$

- la disponibilité de la pompe alimentaire :

• Modélisation

Les états sont :

0 : la pompe est en bon état.

1 : la pompe est en panne.

Graphe de transitions

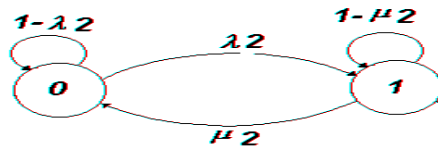


FIGURE 6.11. Graphe de transitions

• Résolution

Les équations d'états sont :

$$\lambda_2 \pi_0 = \mu_2 \pi_1 ; \text{ avec } \pi_0 + \pi_1 = 1$$

On aura :

$$\pi_0 = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}$$

• Disponibilité

$$D_{II} = \pi_0 = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}$$

-la disponibilité des trois chaudières montées en redondance passive :

Nous avons deux chaudières de base qui fonctionnent, l'autre est à l'arrêt. Cette dernière n'est mise en marche que lorsque l'une des deux chaudières de base tombe en panne.

• **Modélisation**

Les états du système sont définis comme suit :

- 0 : les trois chaudières sont en bon état, le système fonctionne.
- 1 : deux chaudières sont en bon état, l'autre est en panne. Le système fonctionne.
- 2 : une chaudière est en bon état, les deux autres sont en panne, le système ne fonctionne pas.
- 3 : les trois chaudières sont en panne. Le système ne fonctionne pas.

Graphe de transitions

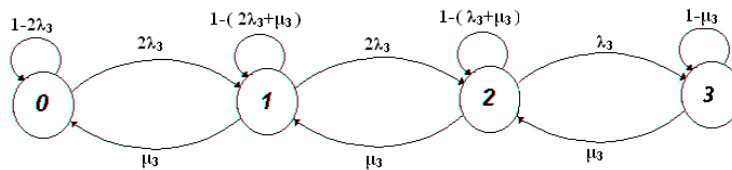


FIGURE 6.12. Graphe de transition

• **Résolution**

Pour le calcul du vecteur π , on a les équations d'états :

$$\begin{aligned} (2\lambda_3 + \mu_3)\pi_1 &= 2\lambda_3\pi_0 + \mu_3\pi_2 \\ (\lambda_3 + \mu_3)\pi_2 &= 2\lambda_3\pi_1 + \mu_3\pi_3 \\ \lambda_3\pi_2 &= \mu_3\pi_3; \text{ avec } \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 = 1 \end{aligned}$$

La résolution du système donne :

$$\begin{aligned} \pi_0 &= \frac{\mu_3^3}{[\mu_3^3 + 2\mu_3^2\lambda_3 + 4\lambda_3^2\mu_3 + 4\lambda_3^3]} \\ \pi_1 &= \frac{2\lambda_3\mu_3^2}{[\mu_3^3 + 2\mu_3^2\lambda_3 + 4\lambda_3^2\mu_3 + 4\lambda_3^3]} \\ \pi_2 &= \frac{4\lambda_3^2\mu_3}{[\mu_3^3 + 2\mu_3^2\lambda_3 + 4\lambda_3^2\mu_3 + 4\lambda_3^3]} \\ \pi_3 &= \frac{4\lambda_3^3}{[\mu_3^3 + 2\mu_3^2\lambda_3 + 4\lambda_3^2\mu_3 + 4\lambda_3^3]} \end{aligned}$$

• **Disponibilité**

Le système fonctionne si au moins deux chaudières sont en bon état. Donc la disponibilité se calcule par :

$$D_{III} = \pi_0 + \pi_1 = \frac{\mu_3^3 + 2\lambda_3\mu_3^2}{[\mu_3^3 + 2\mu_3^2\lambda_3 + 4\lambda_3^2\mu_3 + 4\lambda_3^3]}$$

-la disponibilité du collecteur de vapeur :

• **Modélisation**

Les états sont :

- 0 : le collecteur est en bon état.

1 : le collecteur est en panne.

Graphe de transitions

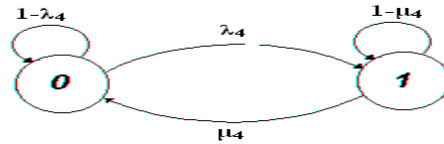


FIGURE 6.13. Graphe de transitions

• Résolution

Les équations d'états sont :

$$\lambda_4\pi_0 = \mu_4\pi_1; \text{ avec } \pi_0 + \pi_1 = 1$$

On aura :

$$\pi_0 = \frac{\mu_4}{\lambda_4 + \mu_4}$$

• Disponibilité

$$D_{VI} = \pi_0 = \frac{\mu_4}{\lambda_4 + \mu_4}$$

La disponibilité du réseau

$$D_r = \frac{1}{\left[\frac{\mu_1^2 + \lambda_1 \mu_1}{[\mu_1^2 + \mu_1 \lambda_1 + \lambda_1^2]}\right]^{-1} + \left[\frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}\right]^{-1} + \left[\frac{\mu_3^3 + 2\lambda_3 \mu_3^2}{[\mu_3^3 + 2\mu_3^2 \lambda_3 + 4\lambda_3^2 \mu_3 + 4\lambda_3^3]}\right]^{-1} + \left[\frac{\mu_4}{\lambda_4 + \mu_4}\right]^{-1} - 3}$$

- Fonctionnement en régime minimal

Le réseau associé :

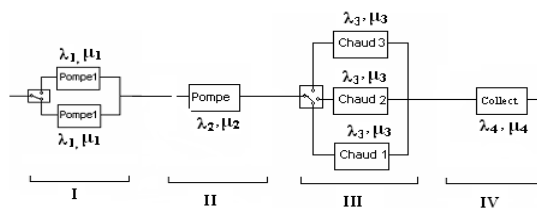


FIGURE 6.14. Fonctionnement en régime minimal

Pour calculer la disponibilité du réseau , nous allons suivre les mêmes étapes que pour le régime normal ; on aura :

- la disponibilité des deux pompes doseuses montées en redondance passive :

$$D_I = \frac{\mu_1^2 + \lambda_1 \mu_1}{[\mu_1^2 + \mu_1 \lambda_1 + \lambda_1^2]}$$

- la disponibilité de la pompe alimentaire :

$$D_{II} = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}$$

- la disponibilité des trois chaudières montées en redondance passive :

Nous avons trois chaudières en redondance passive. Une chaudière de base fonctionne, les deux autres sont à l'arrêt.

• **Modélisation**

Les états du système sont :

- 0 : les trois chaudières sont en bon état, le système fonctionne.
- 1 : deux chaudières sont en bon état, l'autre est en panne. Le système fonctionne.
- 2 : une chaudière est en bon état, les deux autres sont en panne, le système fonctionne.
- 3 : les trois chaudières sont en panne. Le système ne fonctionne pas.

Graphe de transitions

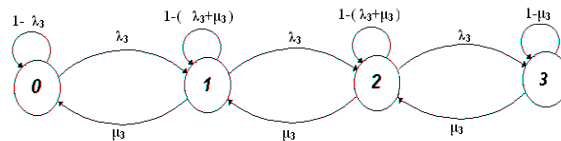


FIGURE 6.15. Graphe de transitions

• **Résolution**

Pour le calcul du vecteur π , on a les équations d'états suivantes :

$$\begin{aligned} \lambda_3 \pi_0 &= \mu_3 \pi_1 \\ (\lambda_3 + \mu_3) \pi_1 &= \lambda_3 \pi_0 + \mu_3 \pi_2 \\ (\lambda_3 + \mu_3) \pi_2 &= \lambda_3 \pi_1 + \mu_3 \pi_3 \\ \lambda_3 \pi_2 &= \mu_3 \pi_3 ; \text{ avec } \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 = 1 \end{aligned}$$

La résolution du système nous donne :

$$\begin{aligned} \pi_0 &= \frac{\mu_3^3}{[\mu_3^3 + \mu_3^2 \lambda_3 + \lambda_3^2 \mu_3 + \lambda_3^3]} \\ \pi_1 &= \frac{\lambda_3 \mu_3^2}{[\mu_3^3 + \mu_3^2 \lambda_3 + \lambda_3^2 \mu_3 + \lambda_3^3]} \\ \pi_2 &= \frac{\lambda_3^2 \mu_3}{[\mu_3^3 + \mu_3^2 \lambda_3 + \lambda_3^2 \mu_3 + \lambda_3^3]} \\ \pi_3 &= \frac{\lambda_3^3}{[\mu_3^3 + \mu_3^2 \lambda_3 + \lambda_3^2 \mu_3 + \lambda_3^3]} \end{aligned}$$

• **Disponibilité**

Le système fonctionne si au moins une chaudière est en bon état. Donc la disponibilité est donnée par :

$$D_{III} = \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 = \frac{\mu_3^3 + \lambda_3 \mu_3^2 + \lambda_3^2 \mu_3}{\mu_3^3 + \mu_3^2 \lambda_3 + \lambda_3^2 \mu_3 + \lambda_3^3}$$

-la disponibilité du collecteur de vapeur :

$$D_{VI} = \frac{\mu_4}{\lambda_4 + \mu_4}$$

La disponibilité du réseau

$$D_r = \frac{1}{\left[\frac{\mu_1^2 + \lambda_1 \mu_1}{\mu_1^2 + \mu_1 \lambda_1 + \lambda_1^2} \right]^{-1} + \left[\frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \right]^{-1} + \left[\frac{\mu_3^3 + \lambda_3 \mu_3^2}{\mu_3^3 + \mu_3^2 \lambda_3 + \lambda_3^2 \mu_3 + \lambda_3^3} \right]^{-1} + \left[\frac{\mu_4}{\lambda_4 + \mu_4} \right]^{-1} - 3}$$

9.3 Calcul de la disponibilité

Le tableau suivant résume les taux moyens de réparation et de panne des équipements :

Equipement	Taux de panne λ	Taux de réparation μ	Taux moyen λ	Taux moyen μ
6651001	0,00100167	0,23889154	0,00079519	0,26555915
6651002	0,00058872	0,29222676		
4500001	0,00125458	0,29291154	0,00146102	0,36770951
4501001	0,00121395	0,54884742		
4502001	0,00191454	0,26136957		
5842001	0,00070309	0,59101654	0,00053499	0,65341807
5842002	0,00036689	0,17581961		
58S3001	0,00054607	0,38491147	0,00054607	0,38491147
2368001	0,00040921	0,35186488	0,00040921	0,35186488

TABLE 6.11. Temps moyens de pannes et de réparations des équipements

· Disponibilité du réseau de fabrication de l’air comprimé en régime normal :

$$D_{c(normal)} = \frac{\mu^2 + \lambda\mu}{[\mu^2 + \mu\lambda + \lambda^2]} = 0,99999109$$

· Disponibilité du réseau de fabrication de l’air comprimé en régime maximal :

$$D_{c(maximal)} = \frac{\mu^2}{[\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2]} = 0,99402913$$

· Disponibilité du réseau de fabrication de la vapeur en régime normal :

$$D_{r(normal)} = 0,99736198$$

· Disponibilité du réseau de fabrication de la vapeur en régime minimal :

$$D_{r(\text{minimal})} = 0,99742431$$

9.4 Interprétation des résultats

D'après ces résultats, on constate que la disponibilité des réseaux (le réseau de fabrication de l'air comprimé et le réseau de fabrication de la vapeur) est proche de 1. Ceci est dû au fait que :

- les temps de réparation (TTR) sont très petits devant les temps de bon fonctionnement (TBF).
- les équipements sont disposés en redondance passive, ce qui augmente la disponibilité du réseau.
- les équipements sont conçus pour fonctionner 24/24h.

Cependant, la disponibilité du réseau de fabrication de la vapeur en régime minimal est légèrement supérieure à celle en régime normal. Ceci s'explique par le fait que le réseau possède une source supplémentaire en régime minimal (deux chaudières en stand-by). Par contre, il n'en possède qu'une seule en régime normal. Idem pour le réseau de fabrication de l'air comprimé. En effet, la disponibilité de ce dernier en régime normal est plus grande que celle en régime maximal, car il possède un compresseur en stand-by pour le fonctionnement en régime normal ce qui n'est pas le cas en régime maximal.

Discussion

Ces résultats ainsi que ceux obtenus dans [1], ont montré que la disponibilité des deux réseaux de la chaufferie est proche de 1 pour les différents régimes de fonctionnement. Cependant, on remarque une légère diminution de cette dernière (disponibilité des deux réseaux) dans notre cas.

10. CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail était d'apprécier l'état actuel de la chaufferie de l'entreprise des corps gras de Béjaia (COGB) en évaluant la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité de ses équipements, tout en tenant compte des résultats obtenus dans une étude déjà effectuée sur cette dernière. Nous avons recensé les données nécessaires à cette étude (nombre de pannes par année, les temps de bon fonctionnement, durées d'intervention, ...) pour pouvoir ensuite les traiter.

Cette étude nous a permis d'avoir une idée sur l'état actuel de la chaufferie. En effet, les résultats de l'analyse ABC effectuée dans le chapitre quatre ont conduit à un système à étudier autre que celui considéré dans [1] (l'apparition de nouveaux équipements critiques, la disparition d'autres équipements et la réapparition de certains autres). L'analyse de fiabilité effectuée a révélé que certains équipements de la chaufferie ont entamé leur période de vie utile alors que pour l'étude [1], ces derniers étaient dans leur période de jeunesse. Ensuite, cette analyse a été complétée par l'application et la comparaison de quelques tests non paramétriques. De plus, l'étude prévisionnelle effectuée a montré une légère diminution du nombre de pannes de ces équipements. D'autre part, le calcul de la disponibilité a donné des résultats proches de ceux

obtenus dans [1], et ce, malgré que les systèmes considérés dans les deux études soient différents.

Une étude basée sur l'analyse approfondie au niveau des composants constituant les équipements de la chaufferie pourrait être effectuée. Cette étude est intéressante pour l'entreprise car elle permet d'agir directement sur les problèmes rencontrés. Il est également intéressant de réaliser une étude économique dans le but d'implanter une politique de maintenance adéquate. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'informations précises (Diagnostic exact de l'équipement, code des pièces rechangées ainsi que leurs coûts, durée d'attente de la pièce de rechange ...). C'est pourquoi nous recommandons aux responsables du service maintenance d'améliorer la collecte des données (notamment par l'informatisation du service).

Références

1. F. Acheuk et M. Hassaim. *Etude de la disponibilité de la chaufferie au niveau de l'entreprise COGB Béjaia*. Mémoire de fin d'études, Dept de Recherche Opérationnelle, Université de Béjaia, 2004.
2. Br. Cobb et Pp. Shenoy et R. Rumi. Approximating probability density functions with mixtures of truncated exponentials. *University of Kansas school of business (USA)*, pages 1–29, March 2004.