

# Diagnostic des défauts par la conversion d'un arbre de défaillance en Réseau Bayésien

Malika MEDKOUR<sup>1</sup>, K Azzedine BOUZAOUT<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Laboratoire de recherche LRPCSI

Departement de Genie mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie. Université 20 Août 1955 – Skikda. B.p.26 route EL-Hadaiek, 21000 Skikda, Algérie

[malakmedkour@yahoo.fr](mailto:malakmedkour@yahoo.fr)

**Résumé** - Dans cet article nous avons utilisé une méthode de diagnostic des défaillances Réseau Bayésien statique basée sur la méthodologie ardeweibull effectué à travers une étude de cas d'une motopompe ; Cet article est structuré en trois parties essentielles. Dans la première, nous avons rappelé à travers un bref aperçu, quelques éléments essentiels sur la loi de weibull ainsi a l'estimation de leurs paramètres intrinsèques. La seconde partie de ce travail est destiné à la construction de l'arbre de défaillance et le réseau Bayésien, et Vu que les arbres de défaillance et les Réseaux Bayésien ce sont deux outils ont un aspect probabiliste, la troisième partie a été consacrée pour éprouvé la forte contribution que donnant les RB dans la localisation et le diagnostique pour analysé des défauts des machines tournantes (cas d'une motopompe).

**Mots Clés** : Probabilité; Diagnostic ; Loi de weibull; Arbre de défaillance; Réseaux Bayésien.

## Nomenclature

$M(t)$	maintenabilité,	$\delta$	paramètre de position (unité de temps)
$R(t)$	fiabilité ;	$\eta$	paramètre d'échelle (unité de temps)
$F(t)$	probabilité de défaillance	<i>Indices et exposants</i>	
$D(t)$	disponibilité instantané ;	$\lambda$	taux de défaillance
MTBF	moyenne de temps de bon fonctionnement, $h$	$\mu$	taux de réparation
TTR	temps technique de réparation, $h$	$t$	temps technique de réparation instantané, $h$
<i>Symboles grecs</i>		$i$	le nombre de l'événement aléatoire
$\beta$	paramètre de forme (sans unité)		

## 1. Introduction

Le Dans le monde industriel actuel, les équipements sujets à des pannes et/ou détériorations sont nombreux. Souvent critiques, ces équipements doivent être maintenus afin de continuer à remplir les missions pour lesquelles ils ont été conçus [1].

La détection, le diagnostic, et la remise en état, représente les trois éléments essentiels à la maîtrise des systèmes industriels ; La surveillance consiste à suivre le comportement du système industriel, elle commence par détection (identification, probabilité d'occurrence), et se termine par un diagnostic (prise de décision) [2] ; Le diagnostic a pour rôle de détecter et de localiser les défaillances qui surviennent sur le système et aussi d'identifier les causes de ces défaillances. Effectuer un diagnostic de défaillances sur un système donné c'est identifier le mode de fonctionnement dans lequel il se trouve [3].

Les chercheurs dans le domaine de la maintenance, ne cessent de développer des moyens d'anticipation, ce qui les a ramené d'user de toutes les techniques, y compris ceux de l'intelligence artificielle (IA), en vu de fiabiliser les diagnostics, et voire même, de prédire les défauts et les pannes, afin de maîtriser les temps d'arrêt, qualifiés souvent de temps morts [4].

L'analyse de fiabilité de systèmes industriels est une des branches les plus dynamiques de recherche [5], elle est abordée à chaque fois que l'on veut des systèmes fiables, disponibles et sûrs. En effet, la fiabilité agit sur la disponibilité et sur la sûreté des systèmes. Elle intervient tout au long du cycle de vie du produit ou du système (conception, fabrication, exploitation) [6].

Une maintenance optimale est reliée à une prévision de la durée de vie des composants de ces systèmes, prévision qui se fonde en premier lieu sur une analyse fine des données de retour d'expérience (REX).

La fiabilité est l'aptitude d'un système à accomplir la fonction à laquelle il est dévolu, dans des conditions d'utilisation données et pendant un intervalle de temps donné (NF X 60-500, 1988), (NF X, 60-510,1986) et (NF X, 60-520, 1988).

La durabilité est l'aptitude d'un système à accomplir cette fonction, dans des conditions d'utilisation et de maintenance données, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint (NF EN 13-306, 2001) [7].

Le dysfonctionnement du système est provoqué par la défaillance d'un ou plusieurs composants, les principales méthodes utilisées lors d'une analyse dysfonctionnelle sont : l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC), l'Analyse des Effets des Erreurs de logiciel (AEEL), les Arbres de Défaillances (AdD) [6].

Dans la suite de cet article on s'intéresse à l'AdD. L'analyse par AdD est une méthode de type déductif. En effet, il s'agit, à partir d'un événement redouté défini a priori, de déterminer les enchaînements d'évènements ou combinaisons d'évènements pouvant finalement conduire à cet événement. Cette analyse permet de remonter de causes en causes jusqu'aux évènements de base susceptibles d'être à l'origine de l'évènement redouté [2].

La modélisation à l'aide de RB présente de nombreux avantages. Pour l'utilisation, leur flexibilité permet d'interroger le même modèle graphique pour des objectifs différents tels que la prédiction ou le diagnostic. De surcroît, ils permettent de modéliser la connaissance même si elle est imparfaite ou manquante par une attribution des probabilités et les algorithmes d'apprentissage [8].

La méthode réseau Bayésien utilisé dans ce travail elle est basée sur la loi de weibull et l'arbre de défaillance effectué à travers une étude de cas d'une motopompe.

Nous pouvons associer à chaque instant « t » soit analytiquement soit graphiquement les fonctions liées au comportement du matériel à savoir :

Fiabilité [7] [9]:

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

Probabilité de défaillance :

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

Maintenabilité :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (3)$$

Disponibilité instantané:

$$D(t) = \frac{\mu}{\mu+\lambda} + \left[ \frac{\lambda}{\mu+\lambda} \right] e^{-(\mu+\lambda)t} \quad (4)$$

## 2. Analyse des défauts par la conversion de l'AdD en RB

### 1.1. Arbre de défaillance

L'analyse par arbre de défaillance (AdD) d'un événement redouté commence par une première étape qui consiste à définir l'événement redouté étudié, ensuite l'élaboration de l'arbre, et enfin l'exploitation de cet arbre. Il convient d'ajouter à ces étapes, une étape préliminaire de connaissance du système. Cette dernière est primordiale pour mener l'analyse et nécessite le plus souvent une connaissance préalable des défaillances. Les liens entre les différents événements identifiés sont réalisés grâce à des portes logiques de type « ET » et « OU » par exemple (figure 1) [2]

Dans un arbre de défaillances constitué de portes « OU », la probabilité de défaillance à la demande de l'événement sommet de l'arbre est donnée par :

$$p(T) = p(M) + p(X_3) - p(M) \times p(X_3) \quad (5)$$

Dans un arbre de défaillances constitué uniquement de portes « ET », la probabilité de défaillance de l'événement sommet de l'arbre est donnée par :

$$p(M) = p(X_1) \times p(X_2) \quad (6)$$

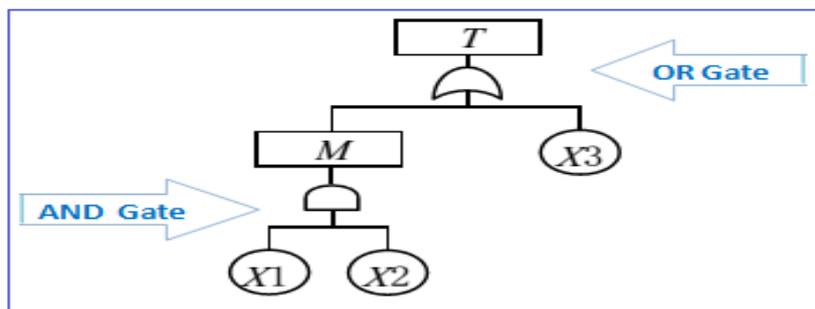


Figure 1 : Réseau Bayésien exprime l'exploitation quantitative de l'arbre de défaillance

### 1.2. Réseau Bayésien

Les réseaux Bayésien (RB) offrent la possibilité de rassembler et de fusionner des connaissances de diverses natures dans un même modèle : retour d'expérience statistique (données historiques issues d'une base de données) et retour d'expérience cognitif (expertise pour résoudre un problème industriel exprimée sous la forme de règle logique) [10].

Un RB est défini par [11] (Figure 2) :

- Un graphe orienté sans circuit (DAG),  $G = (V, E)$ , où  $V$  est l'ensemble des nœuds de  $G$ , et  $E$  l'ensemble des arcs de  $G$  ;
- Un espace probabilisé fini  $(\Omega, Z, p)$  ;
- Un ensemble de variables aléatoires associées aux nœuds du graphe et définies sur  $(\Omega, Z, p)$  telque :

$$p(V_1, V_2, \dots, V_n) = \prod_{i=1}^n p\left(\frac{V_i}{C(V_i)}\right) \quad (7)$$

Où  $C(V_i)$  est l'ensemble des causes (parents) de  $V_i$  dans le graphe  $G$ .

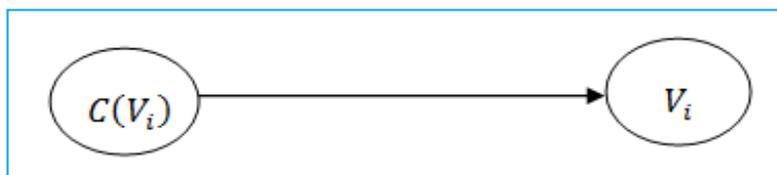


Figure 2 : Représentation graphique d'un simple RB

### 1.3. Transformation de l'Add en RB

Les probabilités d'apparition de l'événement sommet et des événements intermédiaires sont régies par celles des événements de base ; l'occurrence de ces derniers pouvant être modélisée par diverses lois statistiques (Exponentielle, Normale, Log normale, Weibull, Gamma...) [12].

Après avoir construit l'Add, la première étape pour la construction d'un RB à partir d'un Add consiste à convertir la représentation graphique de l'Add en RB. Les éléments graphiques de base pour un Add sont les événements et porte logique ET, et OU, tandis que pour les Réseaux Bayésienne statique les éléments de base sont les nœuds qui représente les événements et les arcs qui modélisent les dépendances [2]

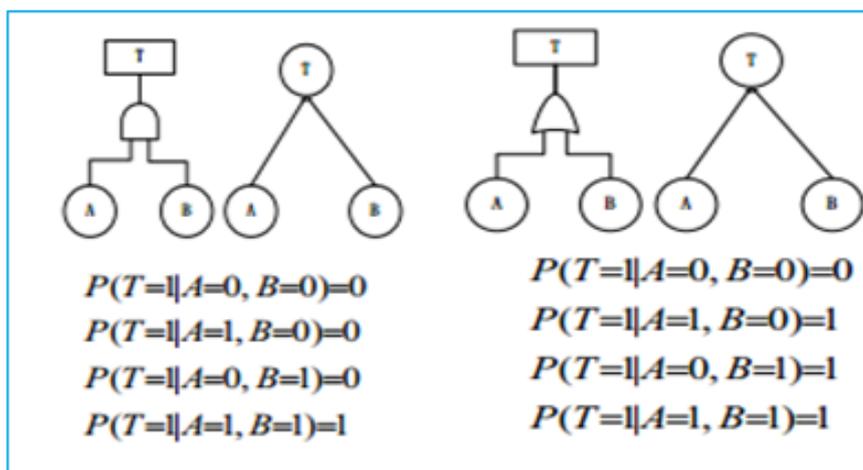


Figure 3 : Conversion numérique d'un AD en RB

### 1. Analyse fonctionnelle du système industrielle

Nous avons procédé a une étude de fiabilité par le modèle de weibull qui avec ses trois paramètres ( $\beta=3.012$ ,  $\eta=2707.58$ ,  $\gamma=0$  et un  $MTBF=2415.31$ ) permet de modéliser tout type de comportement du matériel.

N <sup>o</sup>	TBF	R(t)	F(t)	TTR (h)	M(t) %	T (h)	D(t) %
1	792	0,9756	0,0243	24	0,4564	0.5	99,81
2	1512	0,8411	0,1588	24	0,4564	1	99,64
3	1608	0,8120	0,1879	24	0,4564	1.5	99,49
4	1728	0,7721	0,2278	24	0,4564	2	99,36

5	1752	0,7637	0,2362	24	0,4564	2.5	99,24
6	1776	0,7551	0,2448	24	0,4564	3	99,14
7	1824	0,7376	0,2623	24	0,4564	3.5	99,05
8	1896	0,7104	0,2895	24	0,4564	4	98,98
9	1944	0,6916	0,3083	24	0,4564	4.5	98,91
10	2016	0,6627	0,3372	24	0,4564	5	98,85
11	2040	0,6529	0,3470	24	0,4564	5.5	98,79
12	2064	0,6430	0,3569	24	0,4564	10	98,52
13	2304	0,5406	0,4593	24	0,4564	15	98,43
14	2328	0,5302	0,4697	48	0,7045	20	98,41
15	2520	0,4468	0,5531	48	0,7045	25	98,40
16	2640	0,3958	0,6041	48	0,7045	30	98,40
17	2664	0,3858	0,6141	48	0,7045	35	98,40
18	2760	0,3466	0,6533	48	0,7045	40	98,40
19	2808	0,3276	0,6723	48	0,7045	45	98,40
20	3048	0,2396	0,7603	48	0,7045	50	98,40
21	3168	0,2009	0,7990	24	0,4564	0.5	99,81
22	3192	0,1936	0,8063	24	0,4564	1	99,64
23	3552	0,1038	0,8961	24	0,4564	1.5	99,49
24	3696	0,0778	0,9221	24	0,4564	2	99,36
25	4464	0,0110	0,9889	24	0,4564	2.5	99,24

Tableau 1. Détermination et exploitation des paramètres de weibull

Après la décomposition fonctionnelle des défauts qui affectent le fonctionnement normal de la motopompe (étape quantitative), les relations causales entre ces défauts sont fournies à partir des connaissances d'expert du système motopompe (étape qualitative).

L'analyse quantitative et qualitative étant achevées, nous avons procédé à la construction de l'AdD et RB.

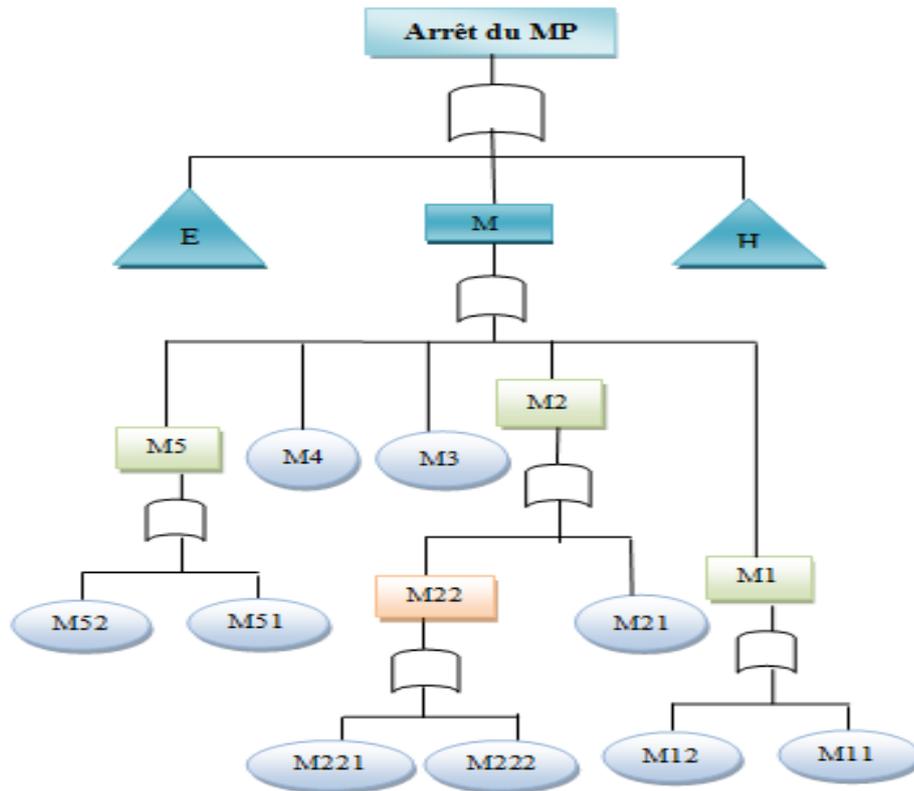


Figure 4 : Analyse qualitative par arbre des causes

Tableau 2. Probabilité marginales des défauts du système

Evénements	Codes	Probabilités a priori	Probabilités a posteriori
Motopompe à l'arrêt	S	PORTE OU	0.109
Defaults mécanique	M	PORTE OU	0.04214
Balourd	M5	PORTE OU	0.01876
Echauffement	M1	PORTE OU	0.00840
Vibration	M2	PORTE OU	0.00918
Bruit mécanique	M22	PORTE OU	0.00897
Defaults Hydrauliques	H	PORTE OU	0.0513
Fuite	H1	PORTE OU	0.0818
Fuite au niveau de la pompe	H11	PORTE OU	0.2070
Augmentation de température	H2	PORTE OU	0.00465
Defaults Electriques	E	PORTE OU	0.020
Surcharge	E4	PORTE ET	0,00109
Survention	E1	PORTE OU	0,00614

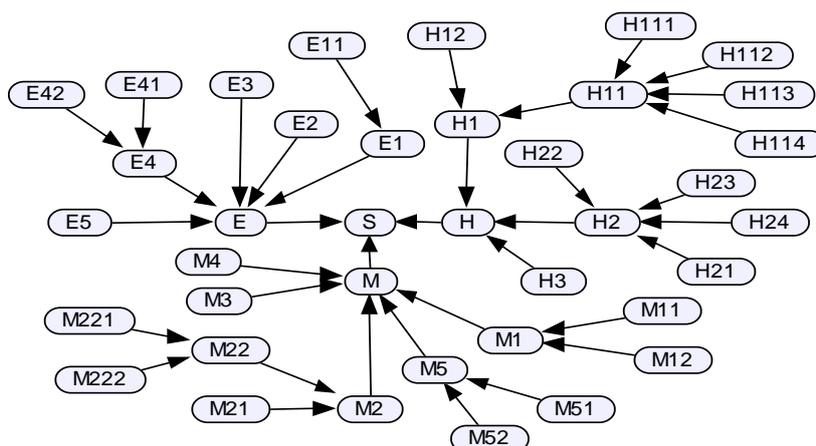


Figure 5 : Réseau Bayésien statique modélisant les défauts de la motopompe

### 3. Diagnostic des défauts par réseau Bayésien

#### 1.4. Modélisation des défauts du système

$$\begin{aligned}
 P(S) &= P(M \cup E \cup H) \\
 &= P(M) + P(E) + P(H) - P(M \cap E) - P(M \cap H) - P(E \cap H) + P(M \cap E \cap H) \\
 &= P(M) + P(E) + P(H) - P(M) \cdot P(E) - P(M) \cdot P(H) - P(E) \cdot P(H) + P(M) \cdot P(E) \cdot P(H)
 \end{aligned}$$

$$P(S, M, E, H) = P(S/M, E, H) \times P(M, E, H) \tag{8}$$

$$P(M/S) = \frac{P(S/M) \times P(M)}{P(S)} \tag{9}$$

$$P(M/S) = \frac{P(S/E) \times P(E)}{P(S)} \tag{10}$$

$$P(H/S) = \frac{P(S/H) \times P(H)}{P(S)} \tag{11}$$

#### 1.5. Inférence et probabilité conditionnelle

Le tableau ci-dessous exprime la connaissance selon laquelle la présence d'un défaut mécanique, électrique ou hydraulique dans la motopompe

Tableau 3 : Probabilité conditionnelle

	M=V				M=F			
	E=V		E=F		E=V		E=F	
	H=V	H=F	H=V	H=F	H=V	H=F	H=V	H=F
S=V	1	1	1	1	1	1	1	0
S=F	0	0	0	0	0	0	0	1

Dans l'arbre de défaillance on parle de la présence d'un défaut (vrai) ou l'absence d'un défaut (faux), mais on peut alors se poser différentes questions.

- Quelle est la probabilité que la motopompe fonctionne encore lorsque qu'il ya un défaut mécanique ?

Pour répondre a cette question de vraisemblance on applique la loi de Bayes, et on peut recalculer toutes les fiabilités de chacune des modalités de chaque variable du réseau.

$P(M = V / S = V)$  Probabilité qu'il ya un défaut mécanique sachant qu'il ya un dysfonctionnement dans la motopompe.

Les probabilités de défaillance des sous systèmes sont normalisé pour devenir des probabilités a priori et on garde deux modalités :

- Présence de défauts
- Absence de défauts.

Tableau 4 : Probabilité marginales des événements M, H, E

défauts	M	E	H
Probabilité a priori	0.0416	0.020	0.0513

$$\begin{aligned}
 P(S = V) &= P(S = V | M = V, E = V, H=V).p(M = V).p(E = V) .p(H = V) + \\
 &P(S = V | M = V, E = V, H=F).p(M = V).p(E = V) .p(H = F) + \\
 &P(S = V | M = V, E = F, H=V).p(M = V).p(E = F) .p(H = V) + \\
 &P(S = V | M = F, E = V, H=V).p(M = F).p(E = V) .p(H = V) + \\
 &P(S = V | M = V, E = F, H=F).p(M = V).p(E = F) .p(H = F) + \\
 &P(S = V | M = F, E = V, H=F).p(M = F).p(E = V) .p(H = F) + \\
 &P(S = V | M = F, E = F, H=V).p(M = F).p(E = F) .p(H = V) + \\
 &P(S = V | M = F, E = F, H=F).p(M = F).p(E = F) .p(H = F).
 \end{aligned}$$

$$P(S=V) = 0.1089$$

$$P(M/S) = 0,382, P(H/S) = 0.471, P(E/S) = 0,183$$

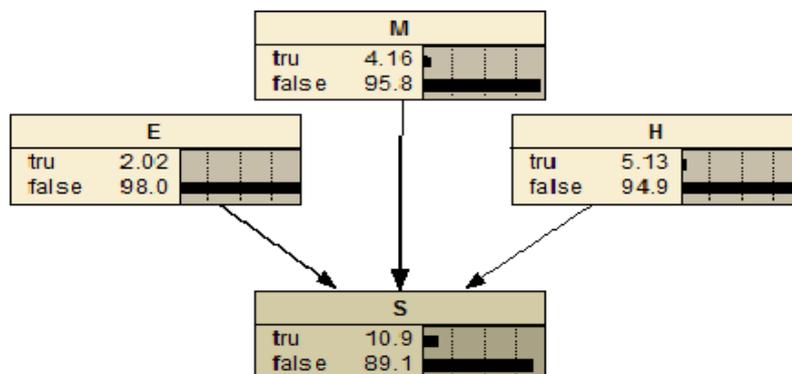


Figure 6 : RB pour les probabilités a priori du Système

#### 4. Discussion

D'après l'étude FMD de la motopompe on constate que l'équipement possède une faible valeur de fiabilité (49.21 %), une maintenabilité de (60.29%), et une disponibilité de (98.4 %), qui ont donne un aperçu sur le comportement de la motopompe pendant le fonctionnement, mais cette dernière n'implique pas l'efficacité.

Les probabilités des défaillances respectivement mécaniques, électriques ou hydrauliques sachant qu'il ya un dysfonctionnement de la motopompe égales 38.20 %, 18.3% ,47.1 %. Ceci nous permet d'actualiser nos croyances pour la probabilité a priori.

La probabilité d'occurrence de l'évènement redouté est identique à celle calculée par AdD,  $P(S) = 0.109$ .

Après analyse par AdD on trouve  $P$  (fonctionnement du MP)  $= 1 - P(S) = 89.1\%$ , ainsi la probabilité d'occurrence de l'évènement sommet  $P$  (arrêt du MP)  $= P(S) = 0.109$ , ce qui vau 10.9%. Cette probabilité est acceptable quantitativement, mais vu que la machine est stratégique et en vu d'optimiser la sûreté de fonctionnement, il faut rechercher à identifier les causes racines du système étudié et à déterminer les solutions correctives et préventives qui minimisent ce pourcentage.

D'après le calcul des probabilités a posteriori (Tableau 2) la présence de défaut est surtout causée par les événements M5 et H11, donc le balourd et la fuite sont les deux événements les plus probable de l'arrêt du MP et doivent être traitent en priorité.

- défaillance partielle

#### 5. Conclusion

Dans notre travail on a fait une étude technique de la maintenance par l'utilisation de la loi de weibull (étude de la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité), permet de suivre l'évolution de l'état de santé de la motopompe.

- Une bonne fiabilité permettra de garantir non seulement la sécurité des systèmes (et par conséquent des personnes) mais aussi la diminution des coûts liés à la maintenance et à la non disponibilité des systèmes.
- Une maintenabilité élevé signifié que la motopompe est facile à réparer.
- Une grande disponibilité malgré le grand nombre de pannes.

L'arbre de défaillance est une méthode d'analyse des défaillances, qui permet à l'aide de son aspect qualitatif et quantitatif, le recensement de toutes les causes, de tous les défauts et leurs combinaisons entraînant l'apparition d'un événement indésirable.

Les réseaux Bayésiennes statique présenté dans ce travaille :

- offre une approche pour diagnostiquer les défauts
- combler l'insuffisance de l'AdD a l'aide de l'inférence par le calcul des probabilités a posteriori a chaque niveau hiérarchique du réseau
- va permettre la propagation de toute nouvelle information sur un composant a tout le système, ce qui est permet de changer nos croyances et combler l'insuffisance de l'arbre de défaillance à l'aide de l'inférence par le calcul des probabilités a posteriori a chaque niveau hiérarchique du réseau.

- pour l'aspect d'utilisation, leur flexibilité permet d'interroger le même modèle graphique pour des objectifs différents tels qu'imaginer des scénarios redouté et modéliser les défauts partielle par l'utilisation des méthodes stochastiques telque la Chain de Markov.

## Références

2. A. Lakehal. Z. Ghemarie. Une nouvelle méthode de diagnostic basée sur la conversion d'un arbre de défaillances en réseau Bayésien, ICIEM 14. International Conference one Industrial Engineering and Manufacturing, Batna University, Algeria May, 11-13, 2014.
3. K. Medjaher, A. Mechraoui, N. Zerhouni ,Diagnosis and forecast of failures by Bayesian network. 2008, Lyon, France.3.
4. Ch. Letot. G. Fleurquin, P .Dehombreux, Reliabilitix un outil d'optimisation de la maintenance basé sur la fiabilité, Université de Mons.2010.
5. A. Benamar .Ch. BOUHAMAR. R. Nouredine, Estimation of the reliability of gas turbines according to the model of Weibull ,Laboratory from Technological Search to Mechanical Manufacturing, The RTFM , ENSET Oran, CIM ' in 2010. Sousse (Tunisia).
6. N. Hammouda, G. Habchi, C. Barthod, O. Duverger .Mise en œuvre d'une méthodologie d'évaluation de la fiabilité pour les systèmes mécatroniques. Congrès Français de Mécanique Bordeaux, 26 au 30 août 2013.
7. H. Mahgoun, R.E. Bekka, A. Felkaoui, Etude Comparative Entre la Transformée de Hilbert, Huang et la Transformée en Ondelettes Continue Dans la Détection des Défauts de Roulements, Journées d'Etudes Nationales de Mécanique, JENM'2011.Ouargla. 07-08 Mars, 2011.
8. P. Vrignat, Manuel Avila, Florent Duculty, Sébastien Aupetit, M. Slimane, F. Kratz, Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi paramétrique et par une approche markovienne .Manuscrit auteur, publié dans ,Revue Sciences et Maintenance, Association française des ingénieurs et responsables de maintenance (AFIM) (2012) 1-28.
9. M.-F. Bouaziz, E. ZAMAÏ, S. HUBAC, Modélisation de L'état De Sante D'un Equipement De, Fabrication Par Une Méthode Probabiliste, Applications Aux Ateliers Semi Conducteurs, Bordeaux, France, MOSIM'12, 2012.
- 10.J. Ma, Y. He, Ch. Wu, Analyse de fiabilité pour que la puissance de pompe à incendie utilisant arbre de défaillance Et RBD, IEEE, Pronostics & System Heath Management Conférence, 2012.
- 11.K. Seli Apedome. M. Bennour, S.A. Addouche, A El Mohamed, L'intégration des aspects cognitifs sur le rendement de l'expérience (expériences), Statistiques dans la résolution des problèmes industriels, 2011.
- 12.A.LAKEHAL, Z. Ghemari, K. Chouaki, F. Z. KHerrour, Diagnostic de des Défauts de transformateur d'énergie électrique basée sur l'analyse de la teneur en eau e utilisant le réseau Bayésien, 2014 IEEE. SCI. 2012, Flight (Theft) 22, No. 3, 585-600.
- 13.A.CABARBAYE, L. Ngom, Simulation dynamique des arbres d'événements, 31401 Toulouse Cedex 04.