

Modélisation de processus industriels par Réseaux Bayésiens Orientés Objet (RBOO) - Application à l'analyse des performances d'un processus industriel

Philippe Weber, Marie-Christine Suhner

► To cite this version:

Philippe Weber, Marie-Christine Suhner. Modélisation de processus industriels par Réseaux Bayésiens Orientés Objet (RBOO) - Application à l'analyse des performances d'un processus industriel. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information - Série RIA : Revue d'Intelligence Artificielle*, Lavoisier, 2004, 18, pp.299-326. <hal-00131315>

HAL Id: hal-00131315

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00131315>

Submitted on 16 Feb 2007

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.

Modélisation de processus industriels par Réseaux Bayésiens Orientés Objet (RBOO)

Application à l'analyse des performances d'un processus industriel

Weber Philippe — Suhner Marie-Christine

Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN),
UMR 7039 – CNRS / UHP / INPL
2, rue Jean Lamour, F-54519 Vandoeuvre-les-Nancy Cedex – FRANCE
{philippe.weber,marie-christine.suhner}@esstin.uhp-nancy.fr

RÉSUMÉ. Cette communication propose une méthode de construction d'un modèle d'aide à la décision à base de Réseaux Bayésiens Orientés Objet (RBOO), dont le but est l'évaluation de la performance globale d'un processus manufacturier dès sa mise en œuvre et au cours de son exploitation. La valeur ajoutée de la méthodologie est de formaliser les modèles à partir de connaissances a priori issues des analyses fonctionnelles et dysfonctionnelles. Les réseaux sont construits sur des principes d'adaptabilité et intègrent les incertitudes sur les relations de causes à effets entre les variables. Il s'agit ensuite d'évaluer en terme de performance l'impact sur le coût global des différentes décisions liées à la maintenance du système. Ceci est effectué grâce à un diagramme d'influence permettant l'estimation du coût associé à chaque décision. Cette méthodologie est testée, dans un contexte manufacturier, grâce à une application sur la maintenance d'un tour.

ABSTRACT. This paper proposes a methodology to develop a decision-making aid system, based on Object Oriented Bayesian Networks (OOBNs), of which purpose is the overall performance evaluation of a manufacturing process from its implementation and during its operating phase. The added value of the methodology is to formalise models from prior knowledge both on the system functioning and malfunctioning. Networks are built on principles of adaptability and integrate uncertainties on the relationships between causes and effects. Thus, the aim is to evaluate, in term of performance, the impact of several decisions about maintenance of the system. This is made thanks to an influence diagram allowing the valuation of the cost associated with every decision. This methodology is tested, in an industrial context, thanks to the maintenance aid on a lathe machine.

MOTS-CLÉS : Aide à la décision – Analyse de performance – Stratégie de maintenance – Disponibilité – Coût – Réseaux Bayésiens Orientés Objet (RBOO) – Diagramme d'influence.

KEYWORDS: Decision-making – Performance analysis – Maintenance strategy – Availability – Cost – Object Oriented Bayesian Networks (OOBNs) – Influence Diagram.

1. Introduction

Depuis plusieurs années, la maintenance n'est plus limitée à la seule vision du matériel siège de la défaillance. Elle intègre les conséquences des défaillances au niveau du système. Les décisions relatives à la gestion de la maintenance ne peuvent plus être isolées de leur contexte. Mais les modèles théoriques d'optimisation de la maintenance, essentiellement orientés composants, sont relativement peu utilisés dans la pratique car ils répondent rarement aux besoins des praticiens de la maintenance des systèmes industriels complexes (Serquin *et al.*, 1996). Les méthodes utilisées le plus couramment pour rationaliser les décisions relatives aux systèmes complexes sont des méthodes essentiellement qualitatives du type RCM (Reliability Centered Maintenance) ou MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité) qui ne recourent pas aux modèles théoriques (Dekker *et al.*, 1998), (Lannoy, 1996). Ces méthodes sont fondées sur des analyses fonctionnelles, par exemple les représentations graphiques de type SADT¹ (IGL, 1989) et dysfonctionnelles comme les représentations sous forme de tableaux de type AMDEC² (CEI, 1985). D'un point de vue quantitatif, les analyses dysfonctionnelles sont réalisées classiquement par des arbres de défaillance (Pagès *et al.*, 1980) ou par des réseaux de Petri (Dutuit *et al.*, 1998). Cependant, l'application de ces méthodes conduit à des arbres ou des réseaux de grande taille dès que la complexité des processus étudiés augmente.

Pour assurer l'optimisation des besoins dans l'entreprise, il est nécessaire d'améliorer les performances globales du système industriel. L'objectif est de dégager des bénéfices en contrôlant les dépenses directes et indirectes liées au processus industriel. Les choix de conception et de maintenance ont des impacts sur le coût global, la disponibilité, la sécurité et la qualité du processus. En particulier, pendant la phase d'exploitation, l'objectif est de comparer plusieurs stratégies de maintenance et de déterminer la combinaison des alternatives qui donne le meilleur compromis entre : disponibilité, coût, qualité de production et sécurité. Il est, de plus, admis qu'une optimisation locale de la disponibilité ou une minimisation locale des coûts de maintenance de chaque composant d'un processus ne conduit pas à une optimisation du coût global.

Dans le domaine de la sûreté de fonctionnement, des travaux récents fondés sur une modélisation de processus industriels à partir de la théorie des Réseaux Bayésiens (RB) ont été développés. Les articles de Portinale *et al.* (1999) et Bobbio *et al.* (2001) démontrent l'équivalence entre les réseaux bayésiens et les arbres de défaillance. Néanmoins, pour les systèmes complexes, un RB de grande taille est nécessaire. Il est, dans ce cas, difficile aussi bien de concevoir le modèle que de le faire évoluer en tenant compte du cycle de vie du processus. C'est pour cette raison que la méthode adoptée dans le projet SERENE (Bouissou *et al.*, 1999) est

1. Structured Analysis and Design Technique

2. Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité

intéressante. La modélisation proposée repose sur la décomposition du réseau bayésien en niveaux hiérarchiques. La méthode a été appliquée à l'analyse de sécurité des systèmes (Bouissou *et al.*, 1999) et à l'analyse des risques de défauts lors de la conception de systèmes informatiques complexes (Fenton *et al.*, 2000).

Les travaux en relation avec le projet SERENE ne décrivent pas les fondements théoriques de l'inférence des réseaux bayésiens « hiérarchisés ». Mais l'article de Koller *et al.*, (1997) explique les principes d'inférence des Réseaux Bayésiens Orientés Objet (RBOO). Cette nouvelle structure permet une modélisation par des réseaux bayésiens communiquant au sein d'une arborescence hiérarchisée. Il semble que les RBOO soient bien adaptés aux problèmes de modélisation des processus industriels dans le cadre de la maintenance et de la sûreté de fonctionnement. En effet, le concept des RBOO permet la construction d'un modèle avec différents niveaux d'abstraction, en partant d'une analyse systémique et en allant vers une décomposition en fonctions particulières (Bangso *et al.*, 2000). Ce mécanisme de hiérarchisation correspond à des méthodes d'analyses fonctionnelles classiquement utilisées en conception de processus industriel (par exemple, SADT) (Weber *et al.*, 2001b, Weber *et al.*, 2002). Enfin, cette approche permet l'élaboration de modèles à partir de structures élémentaires répétées. La précision des paramètres des modèles peut être affinée à partir du retour d'expérience acquis durant le cycle de vie du processus.

Dans le domaine de l'aide à la décision, une des méthodes utilisées repose sur la construction d'arbres de décision. Cette technique a été choisie pour faciliter les prises de décision notamment en matière de maintenance préventive comme l'a illustré Procaccia *et al.*, (1997). Cependant, pour un système complexe et dans le cadre d'une analyse de coût global, il est fastidieux de réaliser cette étude car l'arbre de décision devient trop important.

En ajoutant aux RB des nœuds spécifiques tels que des nœuds d'utilité et des nœuds de décision, nous pouvons prendre en compte des coûts associés à des décisions. Cette modélisation, décrite par Jensen (2001), correspond aux concepts de Diagrammes d'Influence (DI). Les diagrammes d'influence sont des modèles sous forme de graphes. Tenant compte de plusieurs scénarios (décisions), un DI permet d'évaluer l'impact des décisions sur les coûts et les variables représentant le processus. L'ouvrage de Clemen *et al.*, (2001) présente les diagrammes d'influence en parallèle avec les arbres de décision. Ces deux méthodes sont équivalentes du point de vue calcul, mais la représentation par diagramme d'influence est plus compacte et plus facilement applicable aux problèmes de décision de grande taille (Clemen *et al.*, 2001, p. 76).

Après avoir rappelé les principes des réseaux bayésiens (§ 2.), nous détaillons le processus d'aide à la décision utilisé dans le cadre de cette étude (§ 3.). Nous présentons ensuite le principe de modélisation d'un processus industriel à partir des RBOO et des DI (§ 4.). Cette méthode permet d'élaborer, dans une représentation unifiée, un modèle qui combine les connaissances des différentes représentations

jusqu'alors utilisées (SADT, AMDEC, arbres de décision et arbres de défaillances). La mise en œuvre de ce modèle conduit à estimer les performances globales du processus pendant la phase d'exploitation (§ 5.). Plusieurs scénarios de maintenance sont simulés afin d'évaluer les impacts des décisions sur les coûts et la disponibilité du système. Enfin, nous illustrons la méthodologie par une application d'aide à la décision de maintenance d'un tour (§ 6.).

2. Théorie et notations associées aux réseaux bayésiens

Les réseaux bayésiens sont des réseaux probabilistes basés sur la théorie de graphes. Les nœuds représentent les variables du système et les arcs qui les relient indiquent la dépendance ou les liens de cause à effets entre ces variables. Les variables sont définies, en général, de manière discrète grâce à une partition de plusieurs états.

Les RB sont des graphes orientés sans circuit. Ils sont employés pour représenter la connaissance incertaine (Jensen, 1996). Un RB est défini comme une paire : $G = ((N, E), T)$, où (N, E) représente le graphe orienté ; N est un ensemble de nœuds ; E est un ensemble d'arcs orientés $E \subseteq N \times N$ décrivant les dépendances entre des nœuds. T décrit l'ensemble des Tables de Probabilités Conditionnelles (TPC) qui détermine quantitativement la dépendance entre les variables. Dans le cadre de ce travail, les nœuds du RB représentent des variables aléatoires discrètes.

Une variable aléatoire discrète est modélisée par un nœud $n_i \in N$ ayant un nombre fini d'états mutuellement exclusifs, définis dans un espace d'état $S_{n_i} : \{s_1^{n_i}, \dots, s_k^{n_i}, \dots, s_K^{n_i}\}$. Le vecteur P_{n_i} représente la distribution de probabilité sur l'ensemble des états [1].

$$P_{n_i} : \{p_1^{n_i}, \dots, p_k^{n_i}, \dots, p_K^{n_i}\}, \quad p_k^{n_i} \geq 0 \text{ et } \sum_{k=1}^K p_k^{n_i} = 1 \quad [1]$$

avec $p_k^{n_i}$, la probabilité que n_i soit dans l'état $s_k^{n_i}$ définie par la formule [2].

$$p_k^{n_i} = \Pr(n_i = s_k^{n_i}) \quad [2]$$

Dans le RB présenté Figure 1, les nœuds n_i et n_j sont liés par un arc orienté. Les nœuds n_i et n_j sont définis sur les états $S_{n_i} : \{s_1^{n_i}, \dots, s_k^{n_i}, \dots, s_K^{n_i}\}$ et $S_{n_j} : \{s_1^{n_j}, \dots, s_l^{n_j}, \dots, s_L^{n_j}\}$.

Si $(n_i, n_j) \in E$ alors $(n_j, n_i) \notin E$ et n_i est appelé parent de n_j . L'ensemble des parents du nœud n_j est noté $\pi(n_j)$. Dans le RB de la Figure 1, $\pi(n_i) = \emptyset$, n_i est alors appelé un nœud racine.

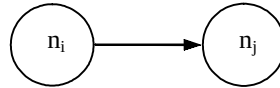


Figure 1. Exemple de réseau bayésien

Dans la paire G , une TPC est associée à chaque nœud de l'ensemble N . La TPC détermine les dépendances entre les différents états des variables aléatoires par des probabilités conditionnelles. Pour chaque nœud, ces probabilités peuvent être définies soit par jugement d'experts, soit par apprentissage. Une table de probabilités est aussi associée au nœud racine n_i (Tableau 1). Cette table est obtenue à partir de la distribution des probabilités sur chaque état de n_i .

n_i	$s_I^{n_i}$	$\Pr(n_i = s_I^{n_i})$
	...	...
	$s_K^{n_i}$	$\Pr(n_i = s_K^{n_i})$

Tableau 1. Table de probabilités associée au nœud n_i

La TPC de n_j est obtenue à partir de la distribution des probabilités sur chaque état de n_j connaissant les états du nœud parent n_i (Tableau 2).

n_j		$s_I^{n_j}$	...	$s_L^{n_j}$
n_i	$s_I^{n_i}$	$\Pr(n_j = s_I^{n_j} n_i = s_I^{n_i})$	...	$\Pr(n_j = s_L^{n_j} n_i = s_I^{n_i})$
	...	...	...	...
	$s_K^{n_i}$	$\Pr(n_j = s_I^{n_j} n_i = s_K^{n_i})$	...	$\Pr(n_j = s_L^{n_j} n_i = s_K^{n_i})$

Tableau 2. Table de Probabilités Conditionnelles associée au nœud n_j

Tout calcul de probabilités dans un RB relève de l'inférence. Dans cet article, nous ne décrivons pas les différents algorithmes existants, aussi nous invitons le lecteur à consulter l'article de Huang *et al.* (1996) pour la description des mécanismes d'inférence des RB. De manière simple, il est possible de calculer par le théorème des probabilités totales, les probabilités marginales du nœud n_j , à partir de la distribution de probabilité de ses parents :

$$\Pr(n_j = s_I^{n_j}) = \Pr(n_j = s_I^{n_j} | n_i = s_I^{n_i}) \cdot \Pr(n_i = s_I^{n_i}) \\ \dots + \Pr(n_j = s_I^{n_j} | n_i = s_K^{n_i}) \cdot \Pr(n_i = s_K^{n_i}) \quad [3]$$

Il est également possible de réaliser l'opération inverse grâce au théorème de Bayes :

$$\Pr(n_i = s_I^{n_i} | n_j = s_I^{n_j}) = \frac{\Pr(n_i = s_I^{n_i}) \cdot \Pr(n_j = s_I^{n_j} | n_i = s_I^{n_i})}{\Pr(n_j = s_I^{n_j})} \quad [4]$$

L'avantage des RB réside dans le calcul des distributions de probabilité sur chaque état des variables selon les observations d'événements. De cette façon, l'inférence permet de calculer les probabilités associées aux différents états d'un nœud, connaissant les états d'une ou de plusieurs autres variables.

Les connaissances sont formalisées par des évidences. Une évidence correspond à une instanciation d'une variable aléatoire qui se traduit dans le RB par la certitude qu'un nœud $n_i \in N$ se trouve dans un état donné parmi les états possibles $S_{n_i} : \{s_I^{n_i}, \dots, s_K^{n_i}, \dots, s_K^{n_i}\}$. Cette évidence est appelée « hard evidence ». Cependant, il est possible d'introduire des connaissances incertaines issues par exemple de plusieurs observations, ou d'une confiance variable sur une observation, nous parlons alors de « soft evidence » comme le décrit l'article de Valtorta *et al.* (2002).

Si aucune évidence n'est disponible, le calcul est fondé sur les probabilités *a priori*. Mais, si une ou plusieurs évidences sont connues, les calculs les prennent en compte. Il est alors possible d'estimer les impacts d'une variable aléatoire sur d'autres variables du processus par inférence du RB.

3. Le processus d'aide à la décision

3.1. Les étapes de l'analyse

Le processus d'aide à la décision proposé dans le cadre de cette étude est composé de neuf étapes. Nous présentons chaque étape en l'illustrant par rapport au problème d'amélioration des performances d'un processus manufacturier.

- Définir l'objectif de l'étude et le point de vue utilisé (décideur) : *atteindre la performance requise en terme de disponibilité et de coût avec comme décideur, le responsable de maintenance.*

- Formuler le problème de décision à résoudre afin de remplir l'objectif selon un point de vue donné : *les principaux choix technologiques étant effectués, déterminer la politique de maintenance pour chaque composant du système.*

- Identifier l'ensemble des décisions (exclusives les unes des autres) qui constituent les alternatives envisageables : *politique de maintenance corrective ou de maintenance préventive systématique, présence d'un composant en stock ou non.*

- Lister l'ensemble des critères (certains ou incertains) en terme de gain, perte ou utilité guidant le choix de la solution et préciser les règles de mesure de ces critères : *coûts de production, coûts fixes, volume d'affaires, coûts liés aux décisions.*

- Déterminer les facteurs externes (non contrôlables) et les facteurs internes (contrôlables) ayant une influence sur les critères incertains : *énergies, disponibilité des composants.*

- Evaluer les probabilités (états de la nature) et les conséquences associées à chaque décision : *évaluation des disponibilités et des fonctions d'utilité associées aux décisions.*

- Identifier les contraintes (ou les préférences) à respecter sur les critères : *disponibilité minimale, coût maximal.*

- Estimer l'espérance des conséquences par la fonction de perte (évaluation économique, objective) ou la fonction d'utilité (subjective) : *espérance de la fonction d'utilité permettant le bilan financier.*

- Choisir la combinaison d'alternatives la meilleure : *la décision choisie est celle qui maximise l'espérance de la fonction d'utilité (ou qui minimise la perte espérée).*

La meilleure combinaison de décisions doit respecter les contraintes imposées. Si ce n'est pas le cas, les contraintes sont à revoir ou de nouvelles actions doivent être envisagées.

3.2. Modèle basé sur la maximisation de l'espérance de l'utilité

Le critère de décision représentant les préférences du décideur utilisé pour cette étude est basé sur la maximisation de l'Espérance de l'Utilité (EU). Considérons une

décision d pouvant prendre K états : $S_d : \{s_1^d, \dots, s_k^d, \dots, s_K^d\}$. Soient $X_k : \{x_k^1, \dots, x_k^j, \dots, x_k^J\}$ les conséquences associées à chaque état s_k^d et $P_k : \{p_k^1, \dots, p_k^j, \dots, p_k^m\}$, les probabilités associées à chaque conséquence. Le décideur choisit l'état de la décision s_k^d qui maximise l'espérance de l'utilité $EU(s_k^d)$ calculée avec [5].

$$EU(s_k^d) = \sum_{j=1}^J p_k^j \cdot u(x_k^j) \quad [5]$$

La fonction d'utilité traduit l'attitude du décideur face au risque. C'est une fonction (par exemple, linéaire) que le décideur doit définir pour chaque décision. Afin de simplifier l'étude, il est possible d'utiliser à la place de la fonction d'utilité une fonction de perte (ou de gain) qui correspond directement à des coûts monétaires.

4. Méthode de modélisation

La théorie des RBOO associée à des nœuds d'utilité permet de modéliser par le biais de diagrammes d'influence les conséquences en terme économique liées à des décisions. Les diagrammes d'influence sont ainsi employés pour le développement de modèles de décision comme une représentation alternative aux arbres de décision (Clemen *et al.*, 2001, Jensen, 2001).

4.1. Les étapes de la modélisation

La construction du diagramme d'influence se déroule en quatre étapes :

- Elaboration de la structure du RBOO à partir de l'analyse fonctionnelle (SADT) et de l'analyse dysfonctionnelle du système (AMDEC). Définition, au niveau de la fonction principale, de l'environnement, des ressources externes et des coûts globaux.
- Description des caractéristiques liées aux composants : causes de défaillances, disponibilité, coûts.
- Sélection des alternatives (combinaison de décisions) à tester à partir d'une étude de criticité : stratégie de maintenance, organisation de maintenance.
- Estimation de l'impact de chaque alternative sur les caractéristiques des composants en terme de disponibilité et de coût.

4.2. Modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle

Le fonctionnement d'un processus industriel est décrit par une analyse fonctionnelle. L'objectif de cette analyse est d'étudier le fonctionnement du processus en relation avec son environnement et les ressources internes ou externes disponibles. Cette étude est faite par une représentation graphique de type SADT. La modélisation est basée sur le principe de décomposition de fonctions (ou activités) en sous-fonctions jusqu'à l'obtention de fonctions élémentaires, supportées par des composants. Chaque fonction remplit une mission qui est, par exemple : modifier un produit grâce à un moyen de production (Figure 2).

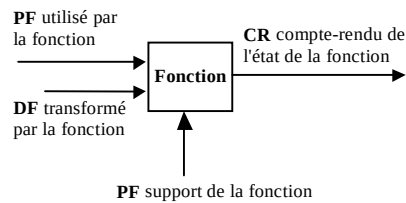


Figure 2. Représentation d'une fonction et des flux associés

Une fonction produit ou consomme des flux d'information. Dans le cadre de cette étude, certaines hypothèses simplificatrices sont faites. Les flux que nous modélisons sont les suivants :

- le flux d'entrée Devoir Faire (DF) matérialisant une commande,
- le flux d'entrée Pouvoir Faire (PF) représentant des énergies, des ressources, ou un support matériel de la fonction,
- enfin, le flux de sortie Compte-Rendu (CR) représentant le résultat de la fonction. Ce flux est une représentation de la réussite de la mission de la fonction.

Les modes de défaillance liés à chaque fonction, les causes de défaillances ainsi que les conséquences de ces défaillances sont déduits de l'analyse fonctionnelle grâce à une étude AMDE. Les modes de fonctionnement et de dysfonctionnement d'un système sont donc étudiés ensemble afin de surveiller chaque variable du système.

Dans le modèle, le flux CR est représenté par une variable qui peut prendre plusieurs états, par exemple : "R" (Réalisé) correspondant à l'état nominal de l'activité, l'état "NC" (Non conforme) ou l'état "NR" (Non Réalisé). Dans ces deux derniers cas, il est nécessaire d'identifier les causes et les effets associés aux états anormaux. Les causes de défaillance sont, soit externes (flux d'entrée), soit internes à la fonction c'est-à-dire liées au flux PF support de la fonction (composant).

Plusieurs états peuvent être associés à chaque composant. Ces états correspondent à l'état nominal ou aux modes de défaillance (mode1, mode2...). De la même façon, les effets des défaillances se situent, soit au niveau du flux de sortie de la fonction, soit au niveau de la dégradation même du composant (qui peut mener à un état de panne). Une cause de défaillance engendre donc un mode de défaillance (par exemple, la dégradation d'une fonction) qui produit un effet sur le flux rendant compte de l'état de la fonction (CR).

L'analyse qualitative AMDE est, en général, complétée par une étude de criticité. Un indice de criticité est affecté à chaque mode de défaillance. Il est évalué à partir de trois critères : la fréquence d'occurrence de la défaillance, la gravité des effets et l'indice de non-détection. L'indice de criticité est utilisé pour déterminer la liste de composants critiques sur lesquels une action de maintenance est envisagée et afin de quantifier les probabilités du modèle.

4.3. Construction du modèle à base de RBOO

Le RBOO est directement construit à partir de l'analyse fonctionnelle et de l'analyse dysfonctionnelle du système. La définition du RBOO est basée sur la décomposition fonctionnelle SADT structurée sous la forme d'un arbre (Figure 3).

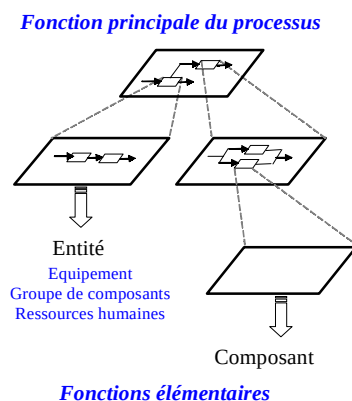


Figure 3. Représentation par RBOO de la décomposition fonctionnelle du système

La racine est un RBOO représentant le niveau d'abstraction le plus haut. Les fonctions élémentaires sont modélisées au niveau le plus bas par d'autres RBOO. L'environnement, les ressources externes et leur disponibilité sont définis au niveau de la fonction principale comme des flux de type PF ou DF.

Les niveaux fonctionnels sont modélisés (Figure 4) en utilisant le RBOO générique. Les variables aléatoires associées aux flux PF, DF sont représentées par

des nœuds d'entrée. La variable associée au flux CR est représentée par un nœud de sortie. Le nombre d'états des nœuds est déterminé à partir de l'AMDE. Si la fonction réalise plusieurs missions, certains nœuds d'entrée et de sortie (PF, DF, CR) peuvent être dupliqués.

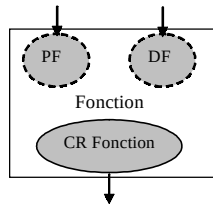


Figure 4. RBOO générique représentant les nœuds d'entrée et de sortie

Les relations entre les sous-fonctions sont modélisées par des fonctions logiques. Il est possible de modéliser les sous-fonctions en parallèle ou en série. La Figure 5 décrit le modèle de deux fonctions F1 et F2 en série et d'une fonction F3 en parallèle avec F1-F2. Le compte-rendu CR F1 est relié à F2 par l'intermédiaire du flux d'entrée DF. Comme les fonctions F1-F2 et F3 sont en parallèle, un nœud OU est relié aux CR F2 et CR F3 de façon à évaluer le CR Fonction de la fonction globale. A ce niveau, seules les liaisons entre les fonctions en parallèle sont définies comme des TPC.

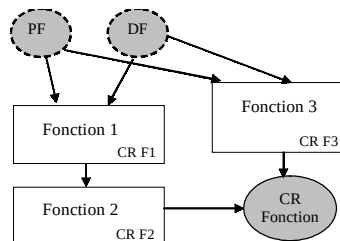


Figure 5. Décomposition fonctionnelle d'une fonction

La TPC d'un nœud OU, pour deux fonctions pour lesquelles CR F2 et CR F3 comportent trois états ("R", "NC", "NR"), est définie dans le Tableau 3. Dans le cas de nœuds booléens, cette table peut être décrite par une fonction logique « OU bruité ». Cependant, dans notre cadre d'application, le nombre d'états des nœuds (CR Fi) n'est pas nécessairement égal à deux. De plus, il est parfois nécessaire d'introduire de l'incertitude par rapport à la propagation d'une dégradation

fonctionnelle sur les fonctions suivantes. Pour toutes ces raisons, nous utilisons une TPC définie classiquement.

CR F2	R			NC			NR		
CR F3	R	NC	NR	R	NC	NR	R	NC	NR
R	1	1	1	1	0	0	1	0	0
NC	0	0	0	0	1	1	0	1	0
NR	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tableau 3. TPC associée à un nœud OU

4.4. Description des composants et des fonctions élémentaires

Nous proposons un RBOO générique pour modéliser les composants (ou groupes de composants). Cette représentation sous une forme générique permet de construire des modèles de composants indépendants de la structure du système modélisé. De cette façon, une boîte à outils de composants permet de faciliter les mises à jour et les modifications de paramètres. Les nœuds constituant le RBOO d'un composant sont les suivants (Figure 6) :

- le nœud composant (CMP) ou groupe de composants selon la finesse du modèle ; ce nœud représente les caractéristiques de disponibilité du composant,
- le nœud d'utilité (U) modélisant le coût global lié au composant (ou au groupe de composants).

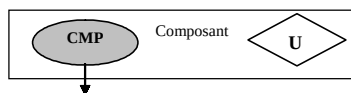


Figure 6. RBOO générique d'un Composant

L'analyse AMDE permet de déterminer les causes de défaillance liées au composant (Tableau 4). Par exemple, pour deux causes de défaillance, les états du nœud CMP (liste considérée comme exhaustive) sont :

- "OK" : si le composant est disponible,
- "C1" : si le composant est indisponible en raison de la cause de défaillance C1,
- "C2" : si le composant est indisponible en raison de la cause de défaillance C2.

Modes de défaillance	Causes	Effets
Fonction élémentaire Mode de défaillance 1	Défaillance CMP C1	Effet 1
	Défaillance CMP C2	Effet 2

Tableau 4. *Extrait d'une AMDE*

CMP	OK (fonctionnement correct)	a
	C1 (cause de défaillance 1)	$\bar{a}_{C1}$
	C2 (cause de défaillance 2)	$\bar{a}_{C2}$

Tableau 5. *Etats et probabilités associées au composant CMP*

Le nœud CMP est défini comme un nœud de sortie du RBOO Composant. Les probabilités *a priori* associées aux nœuds CMP sont estimées pour un temps d'ouverture donné (Tableau 5). La distribution de probabilité *a priori* sur les états de CMP est définie à partir des causes de défaillances (AMDEC) :

- a : disponibilité du composant,
- $\bar{a}_{C1}$: indisponibilité du composant due à la cause de défaillance C1,
- $\bar{a}_{C2}$: indisponibilité du composant due à la cause de défaillance C2.

Ces probabilités dépendent de la fiabilité et de la maintenabilité de chaque composant. Les calculs sont détaillés par Weber *et al.* (2001a). Le modèle de fiabilité choisi est un modèle de Weibull à deux paramètres Weib (β, η). Les paramètres β et η sont obtenus à partir de données fournisseurs, de jugements d'experts ou par retour d'expérience sur un composant similaire. La maintenabilité est estimée selon la stratégie de maintenance choisie pour ce composant. L'estimation des probabilités peut être réalisée en utilisant l'analyse bayésienne qui permet de combiner les jugements d'experts et les données de retour d'expérience (Lannoy *et al.*, 2001).

Le nœud d'utilité U modélise le coût global du composant. Le coût dépend de la fiabilité du composant (probabilité d'occurrence de la défaillance) et de sa maintenabilité. Il se décompose en : coût de réparation suite à une défaillance, coût de maintenance, coût de pièces de rechange, coût de main d'œuvre (Weber *et al.*, 2001a).

Les probabilités associées aux états du nœud CMP sont utilisées pour calculer les probabilités associées aux Fonctions Élémentaires (FE) que le composant réalise. Le nœud CMP est utilisé comme un flux PF supportant la fonction élémentaire. Si un composant réalise une seule FE, l'objet Composant apparaît dans le RBOO de cette fonction. Le nœud représentant la fonction FE est relié au nœud CMP ainsi qu'aux

nœuds d'entrée permettant le calcul des probabilités associées aux états du nœud CR FE (Figure 7). Si le composant réalise plusieurs fonctions, l'objet Composant apparaît à plusieurs niveaux dans le modèle.

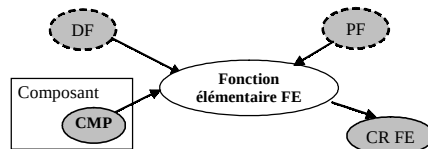


Figure 7. Décomposition d'une fonction élémentaire FE (niveau bas)

Les causes de dégradation d'une fonction élémentaire sont, soit internes liées à CMP, soit externes liées aux nœuds d'entrée PF ou DF. Les causes communes sont décrites aux niveaux hiérarchiques les plus hauts et les informations se propagent par héritage grâce aux nœuds d'entrée et de sortie des RBOO.

Les états du nœud FE sont obtenus à partir des modes de défaillance. Par exemple, le nœud FE peut prendre les états suivants :

- "R" (FE Réalisée),
- "NC" (FE Non conforme ou partiellement réalisée),
- "NR" (FE Non Réalisée).

Les probabilités associées à ces états sont calculées par inférence à partir des états des nœuds parents, que ce soit pour les causes internes (état du nœud CMP) ou pour les causes externes (états des nœuds PF ou DF).

La TPC associée au nœud FE est définie à partir des modes et des causes de défaillances de l'étude AMDE (Tableau 6).

PF		R			NC			NR
CMP		OK	C1	C2	OK	C1	C2	*
FE	R	1	0,2	0	0	0	0	0
	NC	0	0,8	0	1	0,2	0	0
	NR	0	0	1	0	0,8	1	1

Tableau 6. TPC associée à une Fonction Elémentaire (FE)

Les probabilités lient les causes aux modes de défaillance. De plus, la représentation par RBOO permet de modéliser des incertitudes telles que : le fait qu'une combinaison de causes de défaillance (par exemple, PF = "R" et

CMP = "C1") mène à plusieurs modes de défaillance avec différentes probabilités, (par exemple, 0,8 et 0,2 dans le Tableau 6).

4.5. Sélection des décisions associées aux composants

L'utilisation des DI permet de simuler différents scénarios de façon à prendre en compte plusieurs alternatives possibles, par exemple au niveau de la stratégie de maintenance sur les composants.

Cependant, il est nécessaire de sélectionner les composants critiques sur lesquels la stratégie de maintenance peut être améliorée. Le critère de criticité figurant dans l'analyse AMDEC est utilisé pour déterminer la liste des composants critiques. Les avis des experts sont également pris en compte. Lorsqu'une décision est associée à un composant, le modèle devient celui de la Figure 8.

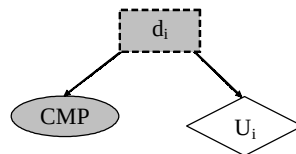


Figure 8. Diagramme d'influence d'un Composant

La décision associée au nœud CMP est modélisée par un nœud de décision (d_i) qui peut prendre plusieurs états exclusifs $S_{d_i} : \{s_1^{d_i}, \dots, s_k^{d_i}, \dots, s_K^{d_i}\}$.

Une décision liée à la stratégie de maintenance peut prendre, par exemple, deux états : "MC" (Maintenance Corrective) ou "MP" (Maintenance Préventive systématique) (Tableau 7).

La valeur du nœud d'utilité U_i associé au composant dépend de la décision sélectionnée (Tableau 8). Si la décision choisie est "MC", alors U_i est lié au coût de la maintenance corrective ($u_{i,MC}$). Si la décision choisie est "MP", alors U_i est lié au coût de la maintenance préventive ($u_{i,MP}$).

La TPC du nœud CMP et la fonction d'utilité sont calculées, pour chaque décision, de la même façon que pour le RBOO générique Composant (Figure 8 et Tableau 9).

d_i	MC
	MP

Tableau 7. Table associée au nœud de décision d_i relié au composant CMP

d_i	MC	MP
U_i	$u_{i,MC}$	$u_{i,MP}$

Tableau 8. Table associée au nœud d'utilité U_i

d_i	MC	MP
CMP	OK	a_{MC}
	C1	$\bar{a}_{MC,C1}$
	C2	$\bar{a}_{MC,C2}$

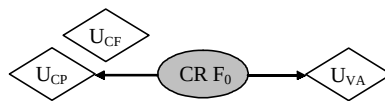
Tableau 9. TPC associée au nœud composant CMP

4.6. Impact sur le coût global

Le coût lié à l'indisponibilité du système est évalué en utilisant une approximation présentée par Fougrousse *et al.* (1992). Nous considérons que la production est proportionnelle à la disponibilité de la fonction principale du système (modélisée par CR F_0) et que les pertes sont dues uniquement à l'indisponibilité du système.

Les impacts financiers sont alors décomposés en Coûts Fixes (CF) constants, en Coûts de Production (CP) et en Volume d'Affaires (VA). Ces deux dernières valeurs dépendent de l'état du nœud CR F_0 .

La Figure 9 représente le diagramme d'influence qui traduit les impacts financiers liés aux états ("R", "NC" et "NR") du nœud représentant la fonction principale CR F_0 . L'évaluation de la performance globale est possible grâce à trois nœuds d'utilité notés U_{CF} , U_{CP} et U_{VA} .

**Figure 9.** Impacts financiers dus à l'indisponibilité du système

Pour un temps d'ouverture donné et une disponibilité maximale, le bénéfice maximum dégagé par la production est égal à u_{VA} , les coûts liés à l'énergie et aux matières premières sont égaux à u_{CP} et les charges incompressibles à u_{CF} . Ces valeurs spécifiques des coûts de production et du volume d'affaires sont alors associées aux états du nœud CR F_0 : "R", "NC" et "NR" (Tableau 10, Tableau 11). Le Tableau 12

présente les CF qui sont indépendants de l'état du nœud $CR F_0$, de l'état des autres variables et des décisions.

$CR F_0$	R	NC	NR
U_{VA}	$u_{VA,R}$	$u_{VA,NC}$	$u_{VA,NR}$

Tableau 10. Table associée au nœud d'utilité U_{VA}

$CR F_0$	R	NC	NR
U_{CP}	$u_{CP,R}$	$u_{CP,NC}$	$u_{CP,NR}$

Tableau 11. Table associée au nœud d'utilité U_{CP}

CF	u_{CF}
----	----------

Tableau 12. Table associée au nœud d'utilité U_{CF}

5. Exploitation du modèle : analyse de performance du processus en fonction des décisions

5.1. Simulation de différents scénarios

L'objectif du système d'aide à la décision élaboré est de comparer plusieurs alternatives entre elles (combinaisons de décisions). L'impact financier de chaque décision d_i ($i = 1$ à m) est évalué par inférence du DI.

Soit une combinaison $D_j : \{s_j^{d_1}, \dots, s_j^{d_i}, \dots, s_j^{d_m}\}$ formée de m décisions d_i . L'état de chaque décision d_i est noté $s_j^{d_i}$. La probabilité $\Pr(CR F_0 = s_k^{CR F_0} | e, D_j)$ représente la probabilité que le nœud $CR F_0$ soit dans l'état $s_k^{CR F_0}$ (pour une combinaison de décisions D_j donnée et en tenant compte des évidences e). L'espérance de la fonction d'utilité (représentant le bénéfice) pour la combinaison de décisions D_j est calculée par [6].

$$\begin{aligned}
 EU(D_j) = EU(s_j^{d_1}, \dots, s_j^{d_i}, \dots, s_j^{d_m}) = & \sum_{s \in S_{CR F_0}} \Pr(CR F_0 = s | e, D_j) \cdot u_{CP}(s) \\
 & + \sum_{s \in S_{CR F_0}} \Pr(s | e, D_j) \cdot u_{VA}(s) + u_{CF} + \sum_{i=1}^m u_i(s_j^{d_i})
 \end{aligned} \tag{6}$$

avec e , les évidences.

Les valeurs $u_{CP}(s)$ et $u_{VA}(s)$ représentent les utilités associées aux nœuds U_{CP} et U_{VA} pour chaque état s du nœud $CR F_0$. La valeur u_{CF} représente l'utilité associée au nœud U_{CF} . Cette valeur est constante quels que soient l'état du nœud $CR F_0$ et l'état des décisions d_i . Les valeurs $u_i(s_j^{d_i})$ représentent les utilités associées aux nœuds CMP . Ces valeurs dépendent uniquement de l'état $s_j^{d_i}$ que chaque décision d_i prend dans la combinaison D_j .

Grâce au diagramme d'influence, il est possible d'estimer la performance globale du processus (en terme de disponibilité globale et de bénéfice), en imposant l'état d'un ou plusieurs nœuds de décisions. Le meilleur compromis est obtenu pour un bénéfice maximal correspondant à la combinaison de décision optimale [7].

$$Opt(D_j|e) = \arg \max_{s_j^{d_i} \in D_j} EU(s_j^{d_1}, \dots, s_j^{d_i}, \dots, s_j^{d_m}) \quad [7]$$

5.2. Utilisation du modèle en exploitation

Une fois les choix liés aux décisions effectués, le modèle à base de RBOO est utilisé comme un modèle de pronostic. Le RBOO permet l'analyse de l'influence de dégradations sur les fonctions du système. Cette analyse est basée sur la simulation de la défaillance d'un composant, une défaillance de cause commune ou la non-conformité d'une sous-fonction.

L'objectif est de prévoir l'impact de ces défaillances sur l'état des fonctions. Il est alors possible d'analyser les conséquences amont ou aval sur l'ensemble du système. En supposant une défaillance d'un composant, l'évidence $Pr(CMP=C1) = 1$ est définie. Les probabilités associées aux sous-fonctions sont alors mises à jour grâce à l'inférence du RBOO. Le CR de chaque fonction traduit les impacts de la défaillance sur chaque niveau fonctionnel.

Pendant la phase d'exploitation du système, les probabilités et les coûts sont mis à jour. La disponibilité et le bénéfice sont alors réévalués en tenant compte de ces nouvelles informations par l'estimation bayésienne, par exemple. Il est ainsi possible de confirmer ou non la pertinence des décisions sélectionnées.

6. Application

Afin de montrer la faisabilité et la valeur ajoutée de cette méthodologie, une application d'aide à la décision de stratégie de maintenance a été développée sur un équipement de production : un tour.

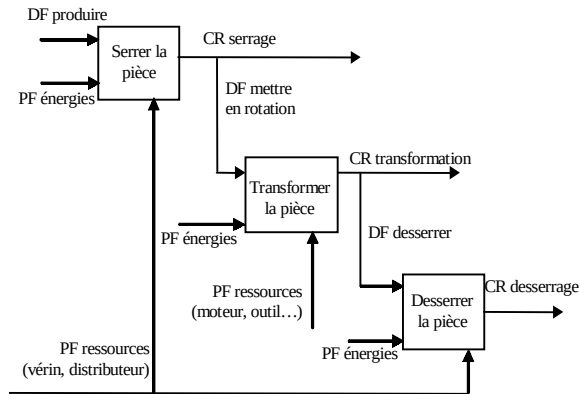


Figure 10. Niveau 0 de l'analyse fonctionnelle du tour

Le niveau 0 Produire de l'analyse fonctionnelle du système est présenté Figure 10. Ce niveau est décomposé en trois sous-fonctions : Serrer la pièce, Transformer la pièce et Desserrer la pièce. Chaque fonction est alors décomposée jusqu'au niveau des composants de l'équipement. Par exemple, la fonction Transformer la pièce est décomposée en deux sous-fonctions : Mettre en rotation et Usiner. La fonction Mettre en rotation est réalisée grâce au composant MOTEUR du tour.

6.1. Modélisation du processus industriel par RBOO

Le logiciel utilisé pour modéliser le système par RBOO et DI est Hugin (2002).

6.1.1. Niveau 0 – Fonction produire (Figure 11 et Figure 12)

Le RBOO de la Figure 11 représente le plus haut niveau de la décomposition fonctionnelle du système. Les nœuds d'entrée sont : PF énergie électrique, PF énergie pneumatique et DF produire. La Fonction produire est décrite à l'aide d'objets RBOO représentant les sous-fonctions : serrer la pièce, transformer la pièce et desserrer la pièce (Figure 12). Les nœuds d'entrée du RBOO sont reliés aux nœuds PF et DF et les nœuds de sortie représentent le compte-rendu CR de chaque sous-fonction.

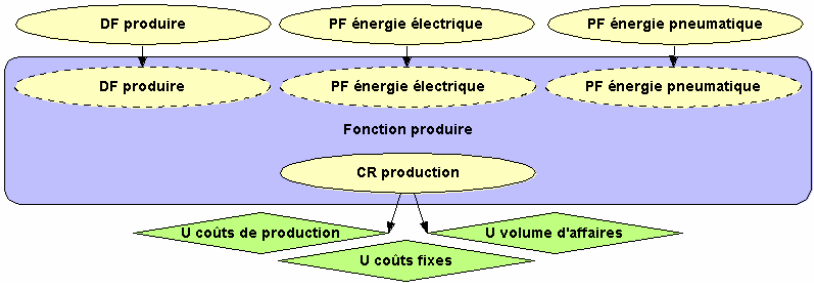


Figure 11. Niveau coût global

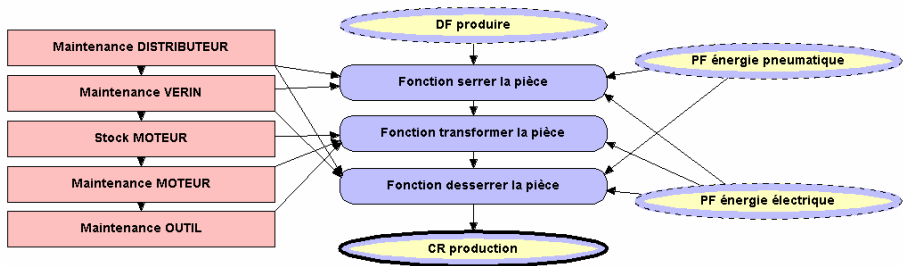


Figure 12. Niveau 0 – RBOO représentant la Fonction produire

Les nœuds de décision associés aux composants DISTRIBUTEUR, VERIN, MOTEUR et OUTIL sont reliés aux sous-fonctions : serrer la pièce, transformer la pièce et desserrer la pièce. Ces décisions sont propagées dans les niveaux hiérarchiques inférieurs.

La performance globale du processus est évaluée grâce aux nœuds d'utilité U volume d'affaires, U coûts de production et U coûts fixes (Tableau 13).

CR production	R	NC	NR
U volume d'affaires	1 000 000	800 000	0

CR production	R	NC	NR
U coûts de production	-200 000	-200 000	0

U coûts fixes	-500 000
---------------	----------

Tableau 13. Tables associées aux nœuds d'utilités

Le volume d'affaires maximal est obtenu si le nœud CR production est dans l'état "R" (fonction réalisée) ce qui correspond à une qualité de production optimale. Si le nœud CR production est dans l'état "NC" (non conforme), le volume d'affaires décroît. De la même façon, si l'on considère que les coûts de production sont indépendants de la qualité, les valeurs correspondant aux états "R" et "NC" sont égales aux coûts de production maximum. Les coûts fixes sont indépendants de l'état du nœud CR production, des autres variables et des décisions.

6.1.2. Niveau 01 – Fonction transformer la pièce (Figure 13) et Niveau 011 – FE mettre en rotation (Figure 14)

La Fonction transformer la pièce est composée de deux sous-fonctions : mettre en rotation et usiner. Les nœuds d'entrée de la Fonction mettre en rotation sont DF mettre en rotation et PF énergie électrique et le nœud de sortie est CR mise en rotation (Figure 13).

La Figure 14 décrit le modèle RBOO associé à la fonction élémentaire FE mettre en rotation (niveau 011). Le modèle du composant MOTEUR apparaît comme support de cette FE. La TPC de la FE est calculée à partir de la logique du système. Dans ce cas, la TPC de la FE mettre en rotation est équivalente à un nœud ET logique (Tableau 14).

Les décisions relatives au Stock MOTEUR (le moteur est en stock ou non) et à la Maintenance MOTEUR (le moteur subit une maintenance corrective ou une maintenance préventive systématique selon différentes périodicités) constituent les entrées du niveau 011. Ces décisions proviennent des niveaux supérieurs et sont propagées au niveau inférieur où apparaît le composant MOTEUR.

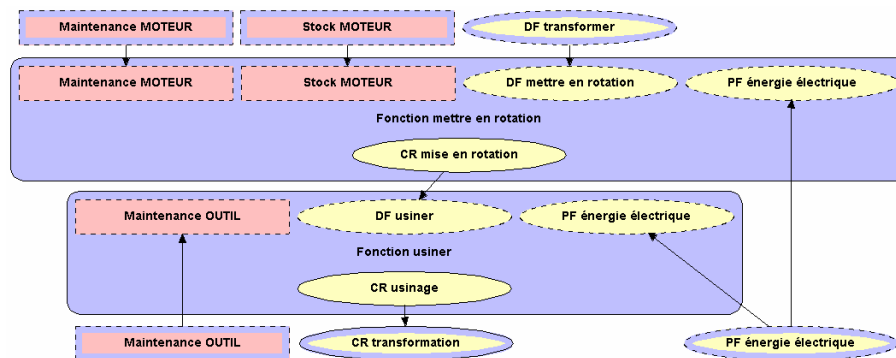


Figure 13. Niveau 01 – RBOO de la Fonction transformer la pièce

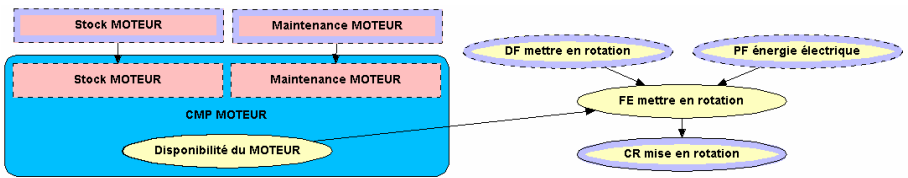


Figure 14. Niveau 011 – RBOO de la FE mettre en rotation

MOTEUR		OK									HS								
PF énergie élec.		R			NC			NR			R			NC			NR		
DF mettre en...		R	NC	NR	R	NC	NR	R	NC	NR	R	NC	NR	R	NC	NR	R	NC	NR
FE mettre en rotation	R	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NC	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NR	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau 14. TPC associée à la FE mettre en rotation

6.1.3. Niveau 0111 – Composant MOTEUR (Figure 15)

Le RBOO Figure 15 modélise le composant MOTEUR. Les décisions concernant le MOTEUR sont décrites par deux nœuds. Le premier correspond à la périodicité de la maintenance systématique Maintenance MOTEUR et le second correspond à la stratégie liée au Stock MOTEUR.

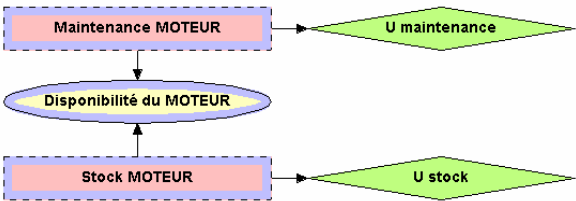


Figure 15. Niveau 0111 – RBOO du CMP MOTEUR

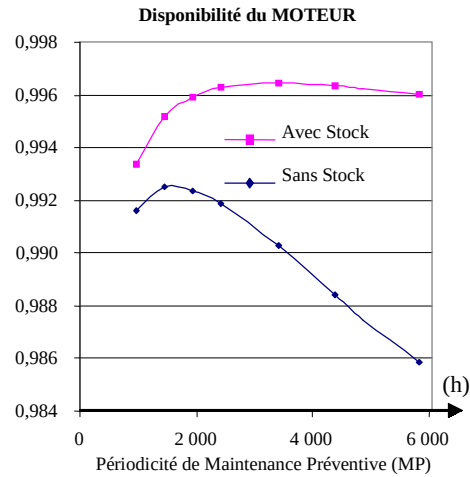


Figure 16. Disponibilité du composant MOTEUR

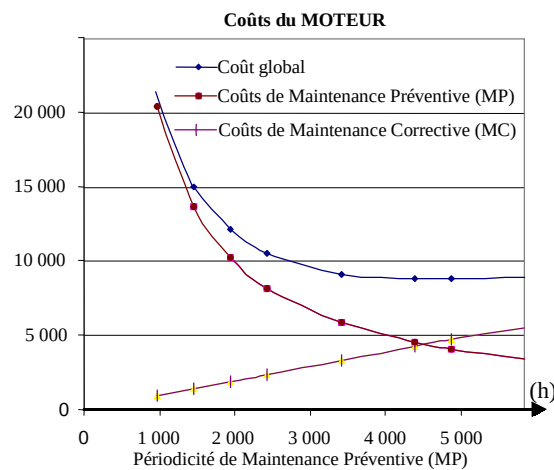


Figure 17. Coûts associés au composant MOTEUR

La disponibilité du composant est calculée en fonction des décisions. Le MOTEUR peut se trouver dans deux états : "OK" ou "HS" selon la disponibilité ou l'indisponibilité du composant. La stratégie concernant le stock et celle concernant la périodicité de maintenance préventive influencent la disponibilité selon la Figure 16. Les valeurs d'indisponibilité obtenues sont reportées dans la TPC associée au nœud MOTEUR en fonction des alternatives réalistes et envisageables sur la périodicité de maintenance préventive.

La Figure 17 présente les coûts associés au composant MOTEUR en fonction de la périodicité de maintenance préventive. Ces coûts sont utilisés pour déterminer la table d'utilité U maintenance selon les états du nœud de décision Maintenance MOTEUR. Le nœud U maintenance est indépendant du nœud de décision Stock MOTEUR. Néanmoins, le stock génère un coût fixe qui dépend des alternatives : "stocker" le moteur ou "ne pas stocker" le moteur. Ce coût est utilisé pour remplir la table d'utilité U stock associée au nœud Stock MOTEUR.

6.2. Utilisation du modèle

6.2.1. Première inférence

Les probabilités *a priori* associées aux états des variables représentent la disponibilité des fonctions. Elles sont estimées suite à une inférence du RBOO selon les décisions sélectionnées (choix de la stratégie de maintenance).

La première simulation est réalisée en choisissant une stratégie de maintenance corrective, sans stock pour le moteur. Les résultats correspondant aux flux DF produire et aux flux CR de chaque sous-fonction sont présentés dans le Tableau 15.

	DF	CR				
	produire	serrage	mise en rotation	usinage	desserrage	production
R	1,000	0,910	0,825	0,814	0,812	0,812
NC	0,000	0,042	0,115	0,116	0,080	0,080
NR	0,000	0,048	0,060	0,070	0,108	0,108

Tableau 15. Résultats de la première inférence

Nous constatons, avec les caractéristiques de disponibilité des composants utilisés, que 82,8 % des pièces sont produites, 1,8 % des pièces sont produites mais non conformes et que 15,2 % des pièces ne sont pas produites. Le bénéfice attendu correspondant à cette combinaison de décisions est égal à 131 000 (EU). Cette valeur constitue, par la suite, notre référence et l'effet des combinaisons de décisions simulées est présenté comme une variation en pourcentage du bénéfice.

6.2.2. Simulation de plusieurs scénarios

Les résultats des simulations de plusieurs scénarios sont présentés dans les Tableau 16, Tableau 17 et Tableau 18 (487 h = 1 mois). L'augmentation de l'utilité espérée est présentée comme un pourcentage du niveau de référence (131 000). Un pourcentage positif traduit une augmentation du bénéfice.

6.2.2.1. Stratégie 1

La combinaison de décisions présentée dans le Tableau 16 maximise la disponibilité de chaque composant (maximum local de la disponibilité).

Composants	Décisions	CR production	
DISTRIBUTEUR	MP 3 896 h	R	83,10 %
VERIN	MP 585 h	NC	7,56 %
MOTEUR	MP 3 409 h Avec Stock	NR	9,34 %
OUTIL	MP 487 h	Utilité Espérée	
		+ 8,2 %	

Tableau 16. Maximisation locale de la disponibilité

6.2.2.2. Stratégie 2

La combinaison de décisions présentée dans le Tableau 17 minimise le coût associé à chaque composant (minimum local du coût).

Composants	Décisions	CR production	
DISTRIBUTEUR	MC	R	82,96 %
VERIN	MP 877 h	NC	7,66 %
MOTEUR	MC Avec Stock	NR	9,38 %
OUTIL	MP 682 h	Utilité Espérée	
		+ 11,4 %	

Tableau 17. Minimisation locale du coût

6.2.2.3. Stratégie 3

La combinaison de décisions présentée dans le Tableau 18 maximise l'utilité espérée. Cette combinaison de décisions correspond au meilleur compromis entre le coût global et la disponibilité du système.

Composants	Décisions	CR production	
DISTRIBUTEUR	MP 3 896 h	R	83,07 %
VERIN	MP 730 h	NC	7,60 %
MOTEUR	MC Avec Stock	NR	9,33 %
OUTIL	MP 682 h	Utilité Espérée	
		+ 12,0 %	

Tableau 18. Maximisation globale de l'espérance de la fonction d'utilité

Le modèle permet donc de comparer différentes stratégies. La minimisation locale du coût des composants ou la maximisation locale de la disponibilité des composants amène une augmentation des bénéfices moins importante que la maximisation globale de l'espérance de la fonction d'utilité évaluée pour chaque combinaison de décisions.

6.2.3. Utilisation du modèle pour le pronostic

Le modèle estime, par inférence, l'impact sur la production d'un fonctionnement non nominal d'un composant ou d'un état dégradé d'une fonction ou d'un flux DF ou PF. Ceci permet d'étudier les défaillances qui n'engendrent pas un arrêt du système. Pour le modèle du tour, nous avons pris en compte plusieurs modes de défaillance pour le vérin de serrage et de desserrage des pièces. Etant donnée une stratégie de maintenance (stratégie 3) et connaissant l'état des variables décrivant les flux d'informations en entrée du système (énergie électrique, pneumatique et matière brute à usiner), nous étudions l'impact sur la production d'une dégradation du composant VERIN (Tableau 19). En comparant différents modes de dégradation, il est possible de classer les dégradations fonctionnelles par ordre de criticité.

CR production	A priori	Vérin OK (Disponible)	Vérin Grippé (Disponible mais grippé)
R	96,0 %	98,0 %	0,0 %
NC	1,5 %	0,5 %	69,0 %
NR	2,5 %	1,5 %	31,0 %

Tableau 19. Distribution de CR production en fonction de l'état du VERIN

6.2.4. Utilisation du modèle pour l'aide au diagnostic

Ce modèle permet aussi une aide au diagnostic. Il est possible d'estimer la distribution de probabilité sur les états des composants connaissant les caractéristiques de la production. Par exemple, sachant que la production est non conforme, les probabilités que les composants soient dans l'état "OK" sont présentées par le Tableau 20. Les défaillances à écarter concernent le TOUR et le MOTEUR. L'état des composants doit être vérifié dans l'ordre de priorité suivant : VERIN, DISTRIBUTEUR et OUTIL.

	Pr (CMP="OK" CR production="NC")
TOUR	1,00
OUTIL	0,99
MOTEUR	1,00
VERIN	0,95
DISTRIBUTEUR	0,99

Tableau 20. Probabilités associées à l'état "OK" des composants pour une production non conforme

7. Conclusion et perspectives

La modélisation que nous avons proposée repose sur la dualité des analyses fonctionnelles et dysfonctionnelles d'un système dont les performances doivent être évaluées et/ou améliorées. C'est grâce aux RBOO que le modèle est décrit dans un cadre statistique formel. Les analyses fonctionnelles et dysfonctionnelles sont généralement menées pendant les phases de conception et permettent de construire facilement la structure du RBOO en le décomposant en plusieurs niveaux d'abstraction.

Le premier intérêt de l'utilisation des RBOO est la formalisation générique de chaque niveau fonctionnel. Le modèle, basé sur l'évaluation économique de l'impact des décisions, est simple et facile à construire. Les composants sont définis d'une manière indépendante du reste du modèle. Ils peuvent être issus de bibliothèques de composants et leurs caractéristiques (disponibilité, coût) sont mises à jour facilement.

Le second intérêt des RBOO réside dans le calcul des probabilités associées aux états d'un nœud, connaissant l'état d'une (ou de plusieurs) variable(s) du système. Il est ainsi possible d'estimer l'impact de l'état d'une variable aléatoire sur le processus. Les calculs prennent en compte les événements incertains et les propagent par des relations de causes à effets. La modélisation proposée associe des paramètres de disponibilité (calculés classiquement avec des modèles complexes) et des données économiques. Les RBOO constituent donc un outil puissant pour l'aide à la décision en maintenance.

La phase de quantification des RBOO est basée sur des jugements d'experts ou sur des études menées sur des projets précédents. Cette étape est cruciale même si l'interrogation d'experts requiert un travail important et n'est pas une tâche facile. Cependant, les valeurs estimées des paramètres du modèle ne doivent pas être nécessairement très précises car le but de l'analyse est de comparer des solutions entre elles. Par la suite, les probabilités sont mises à jour par la prise en compte de données de retour d'expérience. Ceci peut être effectué par une analyse bayésienne. Les données de retour d'expérience recueillies permettent d'ajuster les probabilités contenues dans les TPC par apprentissage.

Nos perspectives de travail reposent sur l'évaluation de la qualité de la décision en intégrant la notion de précision des estimations faites par le réseau bayésien. Il est envisageable d'associer aux probabilités une incertitude afin de mener des études de sensibilité. Les sources d'imprécision proviennent à la fois de la qualité des connaissances, de la quantité de données utilisées pour l'estimation des paramètres des TPC et de la structure du système.

Il est aussi nécessaire de valider le modèle en l'appliquant à un système réel de façon à montrer l'efficacité de cette méthode dans un milieu industriel et de confirmer sa valeur ajoutée par rapport aux systèmes d'aides à la décision traditionnels. Pour cela, il nous reste à concevoir l'interface de génération

automatique des RBOO à partir des analyses SADT et AMDEC afin d'aider l'utilisateur à décrire le modèle, à remplir les TPC et à exploiter les résultats.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier M. B. Iung, Maître de Conférences au CRAN, pour sa contribution à l'élaboration du modèle fonctionnel et dysfonctionnel de l'application.

8. Bibliographie

- Bangso O., Wuillemin P.-H., Object Oriented Bayesian Networks A framework for top down specification of Large Bayesian Networks and repetitive structures, rapport de recherche, September 2000, AALBORG University.
- Bobbio A., Portinale L., Minichino M., Ciancamerla E., « Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks », *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 71, n° 3, 2001, p. 249-260.
- Bouissou M., Martin F., Ourghanlian A., « Assessment of a Safety-Critical System Including Software: A Bayesian Belief Network for Evidence Sources », *Proceedings of the 45th Annual Reliability and Maintainability Symposium RAMS'99*, Washington DC, USA, January 18-21 1999.
- CEI, *Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes – Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)*, Commission Electrotechnique Internationale - CEI 60812-1985 (X60-510-1986), 1985.
- Clemen R., Reilly T., *Making hard decisions with DecisionTools*, Editions Duxbury Thomson Learning, 2001.
- Dekker R., Scart P. A., « On the impact of optimisation models in maintenance decision making: the state of art », *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 60, n° 2, 1998, p. 111-119.
- Dutuit Y., Chatelet E., Signoret J.-P., Thomas P., « Dependability modelling and evaluation by using stochastic Petri nets: application to two test cases », *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 55, n° 2, 1997, p. 117-124.
- Fenton N., Neil M., « Software Metrics: Roadmap », *Proceedings of the 22nd International Conference on Software Engineering The Future of Software Engineering*, 2000, Editions Anthony Finkelstein, ACM Press, p. 357-370.
- Fougerousse S., Germain J., *Pratique de la maintenance industrielle par le coût global*, Paris, Editions AFNOR, 1992.
- Huang C., Dawiche A., « Inference in Belief Networks : A Procedural Guide », *International Journal of Approximate Reasoning*, vol.15, 1996, p. 225-263.

- Hugin, Software Hugin (<http://www.hugin.com/>), 2002.
- IGL Technology, *SADT : un langage pour communiquer*, Paris, Editions Eyrolles, 1989.
- Jensen F.V., *An Introduction to Bayesian Networks*, London, Editions UCL Press, 1996.
- Jensen F.V., *Bayesian Networks and Decision Graphs*, New-York, Editions Springer-Verlag, 2001.
- Koller D., Pfeffer A., « Object-oriented Bayesian networks », *Proceedings of the 13th Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Brown University, Providence, Rhode Island, USA, August 1-3 1997.
- Lannoy A., *Analyse quantitative et utilité du retour d'expérience pour la maintenance des matériels et la sécurité*, Paris, Editions Eyrolles, 1996.
- Lannoy A., Proccacia H., *L'utilisation du jugement d'expert en sûreté de fonctionnement*, Paris, Editions Tec&Doc, 2001.
- Pagès A., Gondran M., *Fiabilité des systèmes*, Paris, Editions Eyrolles, 1980.
- Portinale L., Bobbio A., « Bayesian Networks for Dependability Analysis: an application to Digital Control Reliability », *Proceedings of the 15th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence UAI-99*, July 30-August 1, 1999, p. 551-558.
- Procaccia H., Cordier R., Muller S., « Application of Bayesian statistical decision theory for a maintenance optimization problem », *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 55, n° 2, 1997, p. 143-149.
- Serquin Y., Beaudouin F., « Les modèles d'optimisation des décisions de maintenance : une évaluation critiques », *Actes du 10^{ème} colloque national de fiabilité & maintenabilité λμ 10*, Saint-Malo, France, 1^{er}-3 octobre 1996, p. 637-647.
- Valtorta M., Kim Y.G., Vomlel J., « Soft evidential update for probabilistic multiagent systems », *International journal of Approximate Reasoning*, vol. 29, 2002, p. 71-106.
- Weber P., Suhner M.C. « Aide au choix de stratégie de maintenance par simulation de réseaux bayésiens », *Actes du 4^{ème} Congrès international pluridisciplinaire Qualité et Sûreté de fonctionnement Qualita 2001*, Annecy, France, 22-23 mars 2001 (a), p. 302-307.
- Weber P., M.C. Suhner, Iung B., « System approach-based Bayesian Network to aid maintenance of manufacturing process », *Proceedings of the 6th IFAC Symposium on Cost Oriented Automation Low Cost Automation*, Berlin, Germany, October 8-9 2001 (b).
- Weber P., Suhner M.C., « An application of Bayesian Networks to the performance analysis of a process », *Proceedings of the European Conference on System Dependability and Safety λμ 13 ESREL02*, Lyon, France, 19-21 mars 2002, p. 266-273.