



HAL
open science

Modélisation, à base de Réseaux Bayésiens, d'un système de maintenance industriel et de son environnement pour l'évaluation de ses stratégies de maintenance

Gabriela Medina-Oliva, Philippe Weber, Benoît Iung

► **To cite this version:**

Gabriela Medina-Oliva, Philippe Weber, Benoît Iung. Modélisation, à base de Réseaux Bayésiens, d'un système de maintenance industriel et de son environnement pour l'évaluation de ses stratégies de maintenance. 4èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, JD-JN-MACS, Jun 2011, Marseille, France. pp.CDROM. hal-00614704

HAL Id: hal-00614704

<https://hal.science/hal-00614704>

Submitted on 15 Aug 2011

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, à base de Réseaux Bayésiens, d'un système de maintenance industriel et de son environnement pour l'évaluation de ses stratégies de maintenance

G. Medina-Oliva, P. Weber, B. Iung

CRAN, Nancy-Université, CNRS, Boulevard des Aiguillettes B.P. 70239 F-54506 Vandœuvre lès Nancy, France
(e-mail: {gabriela.medina-oliva, benoit.iung}@cran.uhp-nancy.fr, {philippe.weber}@esstin.uhp-nancy.fr)

Résumé — Ce papier a pour objet de proposer une méthodologie d'élaboration d'un modèle support à l'aide à la décision en maintenance permettant par simulation d'évaluer les différentes stratégies. La valeur ajoutée de la méthodologie réside dans l'unification, à base de Réseaux Bayésiens, des différents types de connaissance nécessaires à la construction de ce modèle d'évaluation. Ce dernier est ainsi construit à partir de motifs génériques et modulables représentatifs des variables décisionnels dans l'évaluation d'une stratégie de maintenance. Ces motifs, par instanciation, facilitent la construction des modèles d'applications spécifiques. Cette méthodologie, issue du projet ANR SKOUB, est testée sur le cas applicatif de la maintenance d'un système de chauffage de l'eau.

MOTS-CLÉS : Aide à la décision – Stratégie de maintenance – Disponibilité – Réseaux Bayésiens

I. INTRODUCTION

Par rapport aux exigences de plus en plus importantes relatives au Maintien en Condition Opérationnelle d'un système industriel, le processus de maintenance joue un rôle fondamental pour l'amélioration de la disponibilité, de la productivité, etc. [1]. Pour essayer de contrôler au mieux ces performances, les responsables de maintenance doivent donc être capables de choisir les stratégies de maintenance et les ressources à mettre en œuvre les plus adaptées aux besoins. Ces choix de prise de décision sont à ce jour basés sur des modèles permettant d'évaluer les stratégies de maintenance à partir d'une quantification du plan de maintenance et de l'organisation associée. [2] par exemple introduit dans ces modèles plusieurs paramètres comme la nature de l'intervention, la fréquence, les conditions de réalisation des interventions [3] ce qui permet de comparer différentes stratégies en calculant des indicateurs clés (Key Performance Indicators- KPI) et de prédire l'écart entre les performances opérationnelles et les objectifs visés. Ces résultats peuvent ensuite être utilisés pour cibler des améliorations basées souvent sur des compromis. Par rapport à ce besoin en évaluation pour des systèmes industriels de plus en plus complexes où les solutions analytiques ne sont plus possibles, un des verrous scientifiques est de disposer d'un modèle intégrant un ensemble de paramètres représentatifs des différentes stratégies et formalisant leurs impacts sur les variables et performances majeures du système.

Face à ce verrou, notre contribution consiste à proposer une méthodologie d'élaboration d'un modèle support à l'aide à la décision en maintenance prenant en compte différents KPIs parfois antagonistes (i.e. disponibilité, coût) et permettant par simulation d'évaluer les stratégies. La valeur ajoutée de la méthodologie réside dans l'unification, à base de Réseaux Bayésiens, des différents types de connaissance nécessaires à la construction de ce modèle d'évaluation. Ce dernier est ainsi construit à partir de motifs génériques et modulables représentatifs des variables décisionnelles.

II. L'ÉVALUATION DES STRATÉGIES DE MAINTENANCE DANS UN CONTEXTE D'INGÉNIEURIE SYSTÈME

Dans les travaux de [3], [4], et [5] les aspects considérés dans les évaluations des stratégies sont principalement les

paramètres déclencheurs des actions de maintenance, les critères des performances à optimiser, le degré de restauration du composant suite à une action de maintenance et l'architecture du système mono-composant ou multi-composant. Ces différents aspects requièrent ainsi d'intégrer normalement dans la modélisation support à l'évaluation, les éléments suivants :

- les dépendances entre les composants,
- les performances multicritères [6],
- les différents points de vue d'un système : fonctionnel, dysfonctionnel, financier, informationnel et organisationnel,
- les interactions du système de maintenance avec le système principal ainsi qu'avec ses systèmes contributeurs,
- l'intégration des informations qualitatives et quantitatives à différents niveaux d'abstraction.

Cependant, la plupart des modèles existants ne supportent pas l'ensemble de ces éléments. Par exemple, [4] ne considère que des systèmes mono-composants, et [7] n'utilisent comme critères d'évaluation que la disponibilité, les coûts ou la fiabilité. Ces manques peuvent conduire à une non prise en compte de plusieurs facteurs clés dans l'évaluation telle que :

- non intégration de l'impact de la maintenance sur les autres performances comme la qualité du produit, le risque, etc [6].
- non intégration, au-delà des aspects techniques (e.g. les mécanismes de dégradation, fréquences des interventions) des aspects humains et organisationnels qui impactent également les performances du système [8],
- non considération des différents types de dépendances (stochastiques, structurelles, économiques...).
- non considération de l'interaction entre le système de maintenance et le système principal qui limite la réutilisation des modèles et la capitalisation de connaissances.

Dans ce contexte, notre contribution scientifique consiste à proposer une méthodologie permettant d'évaluer, sur la base du calcul d'un ensemble d'indicateurs, si l'architecture fonctionnelle du Système de Maintenance (SM) et les stratégies maintenance envisagées (définies notamment à travers le plan de maintenance et son organisation), sont capables de satisfaire les exigences requises par le Système Principal (SP) et ses systèmes contributeurs (processus de pronostic des performances de maintenance dans la phase de conception ou exploitation). Lorsque les objectifs ne sont pas atteints, la détection des causes les plus impactantes sur les déviations des exigences (quantifiées par des performances) du SP doit être réalisée. En ce sens, pour aider à la prise de décision par les responsables de maintenance, nous avons développé un modèle générique qui intègre: (a) les différentes interactions du SM avec ses systèmes contributeurs, (b) l'impact de différentes stratégies de maintenance sur le calcul des indicateurs et (c) l'intégration de connaissances de diverses natures du SP et SM (à la fois qualitative pour les analyses organisationnelles et humaines mais aussi quantitative pour les analyses techniques).

La technique de modélisation retenue, conformément aux justifications de [9], [10] est les Réseaux Bayésiens (RB). Dans cet article nous nous focalisons plus spécifiquement sur

les facteurs décisionnels qui caractérisent une stratégie de maintenance.

Dans les phases de modélisation, l'objectif est de formaliser les interactions du SP avec le SM à travers des modèles de traitement et de données puis de transformer ces modèles à travers une sémantique de codage et des règles de codage génériques et modulables conduisant à un modèle probabiliste en réseaux bayésiens.

III. FORMALISATION DE CONNAISSANCES

Pour formaliser les connaissances des systèmes industriels nous nous appuyons sur la théorie du système général [11] qui permet de représenter le système à travers différentes perspectives (points de vues). Une vue est une représentation partielle des connaissances sur l'élément modélisé. Les vues permettent donc de découper le problème global d'analyse ou de conception du système, en sous-problèmes plus facilement résolubles [11]. Nous détaillons dans [12] les vue fonctionnelle, dysfonctionnelle et informationnelle des flux d'un système (objet). Dans cet article, nous considérons en plus de ces vues, le point de vue organique.

A. Une vue complémentaire : la vue organique d'un système industriel

L'analyse organique comprend la description du système comme un ensemble architecturé de constituants physiques en interaction réalisant les fonctions de l'architecture fonctionnelle [12]. Dans ce sens, nous considérons l'ensemble des événements qui conduisent à un événement redouté et la recherche des liens logiques entre les composants indispensables au succès de la mission du système. Pour supporter ce point de vue nous pouvons utiliser des diagrammes de fiabilité ou des arbres de défaillances.

B. Formalisation de connaissances appliquées à un système de maintenance (SM)

Par rapport à l'objectif global de modélisation de cette contribution, nous proposons d'appliquer les mêmes points de vues expliqués précédemment pour le SP au SM en y ajoutant un point de vue organisationnel ainsi que l'impact de la maintenance sur l'état du composant afin de faire face à la problématique scientifique expliquée dans la section II.

B.1. Vue fonctionnelle du SM

Selon la norme [3], la maintenance est définie comme l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. En conséquence, les interventions de maintenance peuvent être représentées comme une fonction puisqu'elles transforment l'état d'un composant (dégradé, défaillant) vers un autre état amélioré (réparé, fonctionnel). En tenant compte de la théorie du système général et de la modélisation des processus, différents types de flux peuvent être pris en compte entre les fonctions, comme montré dans la (Figure 1), par rapport à la fonction globale « maintenir l'équipement ».

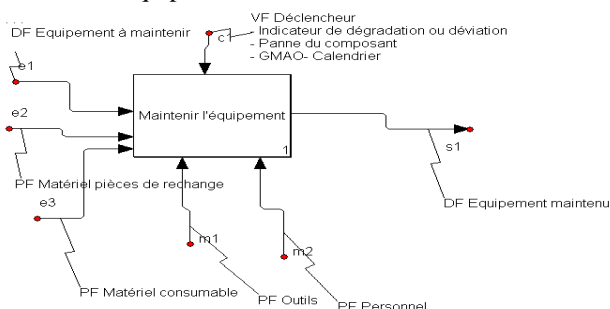


Figure 1. Fonction principale du SM

B.2. Vue dysfonctionnelle du SM

Le point de vue dysfonctionnel complète la partie fonctionnelle, c'est-à-dire, cette vue permet l'identification des états de dysfonctionnement du composant ainsi que les déviations des flux entrants et sortants de la fonction.

Pour la maintenance une déviation du flux peut être représentée comme la disponibilité ou l'indisponibilité (i.e. pas de) d'un outil. Cette vue a été supportée par une analyse duale des défaillances/dégradations avec l'AMDEC et des modifications des propriétés des flux entrant (cause de la défaillance) et sortant (effet de la défaillance) avec l'HAZOP.

B.3. Vue informationnelle de la maintenance (objet)

Du point de vue objet, nous représentons les attributs des flux de la fonction « maintenir l'équipement » qui est caractérisée principalement par deux attributs : sa durée (délais de la maintenance) et son impact sur l'état du composant (son efficacité). La Figure 2 montre la relation entre les différents objets ainsi que les attributs de ces objets sur un diagramme de block en SysML.

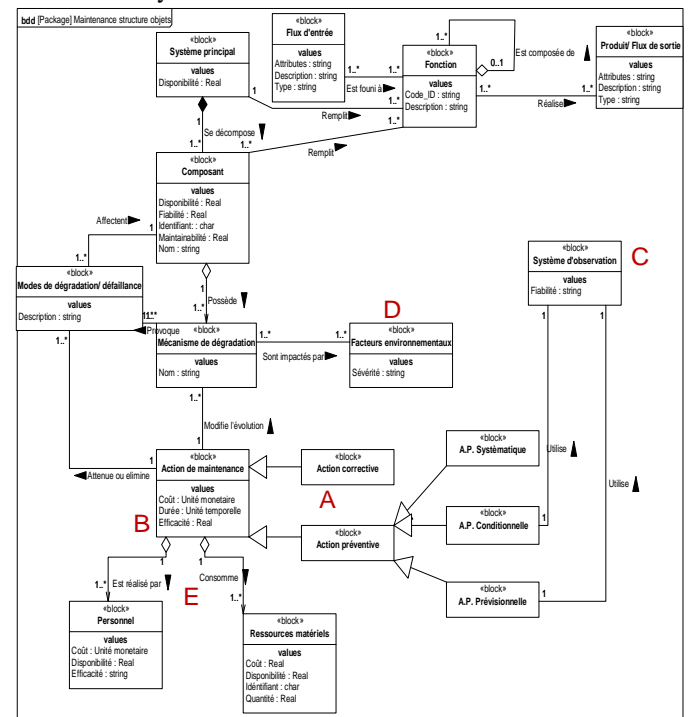


Figure 2. Relation entre les objets de la maintenance et ses attributs

B.4. Vue organisationnelle du SM

Les opérateurs de maintenance sont influencés principalement dans l'exécution de leurs actions par le contexte organisationnel dans lequel ils évoluent. Dans ce sens, le point de vue organisationnel du SM a été construit sur l'étude des facteurs pathogènes (i.e. pression de production...) modélisés dans [8] qui impactent le déroulement de ces actions.

B.5. Vue organique du SM

Pour créer la structure correspondante au SM (l'impact du SM sur le SP), nous nous basons sur le point de vue organique. Celui-ci est représenté par la fonction de structure entre les différents composants d'un système définie dans un diagramme de fiabilité. Dans ce sens, la vue organique nous permet de résoudre la problématique de représentation des systèmes multi-composants.

Dans ces modèles se retrouvent toutes les variables décisionnelles et les facteurs qui impactent le choix d'une stratégie de maintenance ainsi que des systèmes contributeurs de la maintenance tels que la logistique et les ressources humaines.

C. Variables décisionnelles et facteurs qui impactent les évaluations des stratégies de maintenance

Les variables décisionnelles représentatives des choix sur les stratégies de maintenance à mettre en place impactent les performances du SM et du SP. Ces variables nous permettent d'intégrer différents aspects d'un système: technique, humain et organisationnel spécifiés dans la section II, et ils sont représentés dans la Figure 2 comme des objets ou comme des attributs d'objets.

C.1. Type de stratégies de maintenance- Figure 2 « Point A »

Traditionnellement deux types de maintenance sont différenciés en fonction de l'occurrence de la défaillance : la maintenance corrective et la maintenance préventive en sachant que cette dernière se différencie en stratégies de maintenance systématiques, conditionnelles et prévisionnelles [13].

C.2. Efficacité de la maintenance- Figure 2 « Point B »

L'un des attributs principaux d'une intervention de maintenance est l'impact de cette action sur l'état de dégradation du composant (health condition). Ils existent trois façons de caractériser l'efficacité [14]:

- Totale (AGAN): chaque action de maintenance remet à zéro le taux de défaillance du système. Ce cas s'adapte bien aux remplacements des composants.
- Partielle (ABAO): Une action minimale remet le système en fonctionnement mais le taux de défaillance reste identique.
- Imparfait : C'est un type de modélisation plus réaliste car après l'action, l'état du système n'est ni comme neuf ni comme avant la défaillance, mais dans un état intermédiaire borné par ces deux extrêmes..

C.3. Système d'observation - Figure 2 « Point C »

L'une des caractéristiques importantes dans la maintenance conditionnelle et prévisionnelle est la fiabilité de son système d'observation pouvant dans certains cas engendrer des erreurs (qualité de la surveillance). Des travaux ont étudiés et modélisés ces erreurs en considérant une probabilité $1 - \beta$ pour la détection d'un défaut suite à une inspection et β pour la non-détection. Dans d'autre cas l'erreur provoque des fausses alarmes, et donc une intervention est déclenchée alors que le composant est en bon état. Il est intéressant de prendre en compte cet aspect puisque la fiabilité du système d'observation impacte les types d'action, dans le sens où lorsque le système ne détecte pas le niveau adéquat de la dégradation, le composant risque de tomber en panne entraînant un surcoût due à une opération de maintenance corrective plus élevée que le coût d'une action de maintenance préventive. D'autre part, si le système génère une fausse alarme, alors une action sera réalisée sur un composant en bon état, donc l'action préventive sera considérée comme partielle (n'améliore pas l'état du composant et l'indisponibilité est aggravée à cause du temps où le système est hors service) avec des coûts en augmentation.

C.4. Facteurs environnementaux - Figure 2 « Point D »

L'environnement auquel sont soumis les composants est une variable exogène à la maintenance. Cependant elle impacte la performance du système, plus spécifiquement la vitesse des mécanismes de dégradation. Pour estimer l'influence de l'environnement, nous pouvons les considérer comme des facteurs 'globaux' qui impactent les performances du système [15] avec l'inconvénient de provoquer une perte de précision due à l'agrégation de l'influence de l'ensemble des variables dans des « macro-variables ». Nous identifions deux macro-variables environnementales qui impactent la performance du composant : conditions nominales et conditions non-nominales. Les conditions nominales sont les conditions

d'exploitation et d'environnement pour lesquelles le système est conçu, et les conditions non-nominales sont les conditions qui sont hors de la plage nominale fixée en conception.

C.5. Facteurs qui impactent la mise en œuvre des stratégies de maintenance : la logistique, l'efficacité du personnel et les facteurs organisationnels - Figure 2 « Point E »

Les durées d'opérations de maintenance dépendent des moyens logistiques de maintenance qui sont effectivement mis en œuvre (personnel, formation, stocks de pièces de rechange, moyens matériels, documentation, etc.) et des facteurs humains tels que la motivation, compétences, expérience, etc. [16]. Les performances de l'opérateur sont impactées par les diverses interactions qu'il a avec son environnement- issues de l'organisation et du management de l'entreprise (point B4). Les facteurs considérés sont une adaptation de ceux modélisés dans [8] mais ne sont pas traités dans cette publication.

IV. UNIFICATION DE LA CONNAISSANCE DANS UN MODELE A BASE DE RESEAUX BAYESIENS

Pour modéliser les différents aspects du SP et du SM dans un modèle réseaux bayésiens (RB), nous proposons de prendre en compte les connaissances décrites dans les différents points de vue expliqués précédemment.

Ces connaissances sont traduites sous la forme d'un modèle probabiliste où les variables sont représentées par les nœuds et leurs relations de dépendance ou de causalité sont représentées par les arcs. Les relations entre les variables sont spécifiées dans l'analyse informationnelle ou dans l'analyse fonctionnelle lorsqu'il y a des échanges de flux entre les fonctions.

De cette façon, il est possible de construire des motifs représentatifs de la mise en place des stratégies de maintenance ainsi que de son impact sur la disponibilité du composant. La construction du RB se déroule en trois étapes :

- Elaboration de la structure du réseau à partir de la fonction maintenir l'équipement (vue fonctionnelle), c'est-à-dire l'intégration des variables représentant les flux d'entrée et de sortie dans le processus de maintenance ou des attributs de flux (vue informationnelle). Plusieurs variables peuvent être intégrées pour représenter un flux d'entrée ou de sortie.
- Assemblage de ces variables sous la forme des motifs en tenant compte des relations exprimées principalement dans la vue objet et les échanges de flux dans la vue fonctionnelle, ainsi que les interactions avec les systèmes contributeurs du SM et du SP.
- Définition des états des variables d'entrée et de sortie issues de l'analyse dysfonctionnelle (par exemple pour le système d'observation nous identifions trois modalités : fausse-alarme, non-détection et détection).
- Définition des probabilités conditionnelles données par les historiques, la logique combinatoire, l'expertise ou des facteurs d'aggravation/amélioration.

Ces différents types de connaissances sont insérés ensuite dans les tables de probabilités conditionnelles (TPC) des variables.

Par exemple, pour créer la structure du motif du plan de maintenance, nous nous basons surtout sur le point de vue informationnel (Figure 2). En effet le diagramme montre que les actions de maintenance sont de type préventive systématique, préventive conditionnelle, préventive prévisionnelle ou corrective. En conséquence une variable appelée « Type de Maintenance » est créée avec deux modalités : préventive et corrective (Figure 3, « Point A »). Ce nœud condense la totalité des actions à réaliser dans le plan de maintenance. Ensuite, nous constatons que les actions conditionnelles et prévisionnelles ont besoin d'un système d'observation (Figure 3, « Point B ») considéré par l'un de ses attributs : sa fiabilité. Ce dernier est intégré dans le motif à

travers la variable « fiabilité du système d'observation ». Elle impacte sur les actions prévues dans le plan de maintenance (cela sera expliqué dans la section V). Cet effet est observé à travers la variable « Type de maintenance corrigé » (Figure 3, « Point C »). En plus, les actions prévues dans le plan de maintenance ont une efficacité (attribut des actions de maintenance). De façon indépendante du type de maintenance, l'efficacité du plan de maintenance (« pertinence du plan de maintenance ») représente le degré de restauration dues aux actions de maintenance sur un composant et fait référence à l'efficacité prévue dans le plan de maintenance (Figure 3, « Point D »). Tel que spécifié dans le diagramme de bloc, elle élimine ou atténue les modes de défaillance impactant un attribut du composant, sa « disponibilité » (Figure 3, « Point F »).

De façon similaire, nous avons construit les autre motifs génériques qui impactent la disponibilité du composant. Sur la Figure 3 deux nœuds quantifient la disponibilité du système. Le premier est impacté par l'ensemble des actions prévues dans le plan de maintenance ainsi que par les conditions d'exploitation auxquelles le composant est soumis (Figure 3 : impact des actions et de l'environnement sur le composant). Ensuite, la disponibilité du composant est impactée par les moyens logistiques et organisationnels.

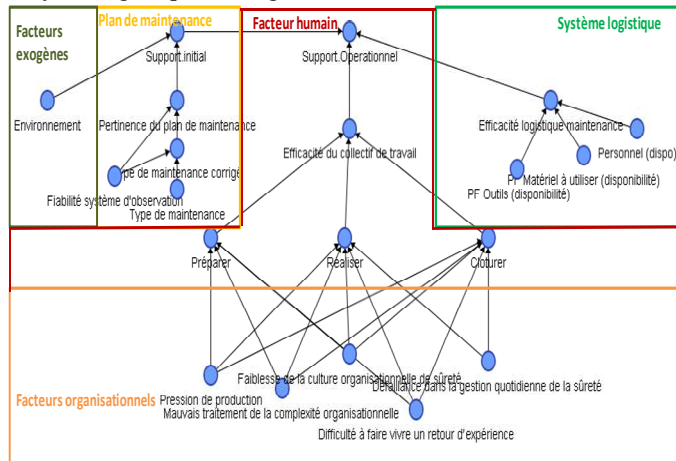


Figure 3. Motifs de modélisation de l'impact des actions de maintenance sur un composant

Pour calculer la probabilité de succès de la mission du système nous nous appuyons sur le point de vue organique où sont spécifiés les liens logiques entre les composants.

De cette façon nous avons construit des motifs génériques et modulables sur différents aspects impactant l'architecture de maintenance, afin d'unifier les connaissances nécessaires pour l'évaluation d'indicateurs de performance clé tel que la disponibilité. Ce type de structure facilite et guide la construction d'un modèle global pour une application spécifique en permettant la capitalisation et la réutilisation des motifs du modèle.

V. APPLICATION

Nous illustrons la quantification de ce modèle à travers l'application du motif générique pour évaluer « l'impact du plan de maintenance sur un composant » (défini sous la forme de réseaux bayésiens). Ce motif est ainsi particularisé au cas d'un exemple classique de chauffage de l'eau dans un système industriel (Figure 4). L'objectif du processus thermique est d'assurer un débit constant de l'eau avec une température donnée. Le processus est composé d'un réservoir équipé avec une résistance de chauffe R1.

Les entrées du système sont le débit d'eau Q_i , la température de l'eau T_i et l'énergie électrique du dispositif de chauffe laquelle est contrôlée par un ordinateur.

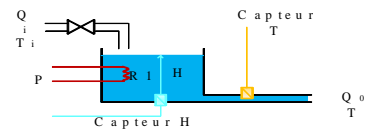


Figure 4. Système de Chauffage de l'eau

Les sorties sont le débit d'eau Q_o et la température T qui est régulée autour d'un point de fonctionnement ($Q_i=Q_o= 20 \text{ l min}^{-1}$ et $T=50 \text{ }^\circ\text{C}$) (Figure 5). Pour simplifier notre exemple, nous nous limitons à l'étude de la fonction A3 de la Figure 5 et l'un des composants qui la supporte la R1. Toutefois, la méthodologie est applicable à tous les composants du système. Les liens entre les différents composants (l'assemblage des motifs) sont basés sur les échanges de flux entre les différentes fonctions. L'hypothèse réalisée dans le modèle est de considérer l'évolution indépendante de chaque composant sans considérer les défaillances « techniques » de causes communes. Toutefois, les défaillances de causes humaines communes sont prises en compte, c'est-à-dire, la non-efficacité des actions humaines peut causer des défaillances dans plusieurs composants du système.

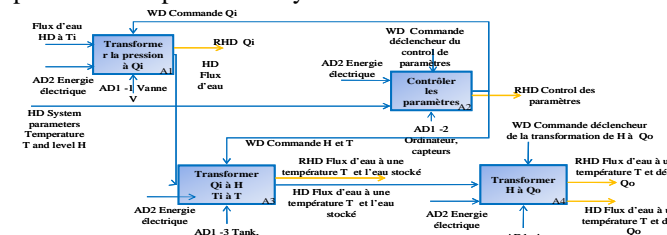


Figure 5. Analyse fonctionnelle du système de chauffage de l'eau

- **Nœud « Type de maintenance »** (Figure 3, « Point A ») Le composant sera soumis à un plan de maintenance préventive systématique tel que tests de l'étanchéité, nettoyage de la résistance (pour éviter le tartre), etc. Les actions sont réparties de la façon suivante : $P(AM = corrective) = 0,3$ et $P(AM = préventive) = 0,7$. Cette répartition de probabilité se base sur des données d'historiques à travers le calcul de probabilité d'un événement par sa fréquence relative [17].

- **Nœud « Système d'observation »** (Figure 3, « Point B ») Pour intégrer la maintenance conditionnelle (des inspections), la « fiabilité du système d'observation » doit être considéré. Dans ce cas les inspections ont la loi, de distribution des probabilités suivante : fausse alarme 0,01, non-détection 0,03 et détection 0,96. La probabilité de non-détection peut être estimée à travers l'analyse de l'historique des actions correctives dans des applications similaires (actions liées à la non-détection du système d'observation). Ce principe peut être appliqué aussi à la probabilité de fausse alarme.

- **Nœud « Type de maintenance corrigé »** (Figure 3, « Point C »)

Le système d'observation ($SO = \{\text{Détection, non-détection, fausse alarme}\}$) impacte les types d'actions prévues dans le plan de maintenance (modalités : correctives et préventives). Donc, les actions de type corrective resteront telles que prévues dans le plan puisque les actions correctives n'ont pas besoin d'un système d'observation. En revanche, les proportions de maintenance préventives (conditionnelle et prévisionnelle) seront modifiées (corrigées) tels que :

$$P(SO = fausse alarme) = P(AM = préventive)$$

$$\times P(AM^p = conditionnelles) \times P(Xi = non détecté / Di = produite).$$

Cette probabilité est attribuée aux actions préventives partielles puisqu'une action sera réalisée sur un composant en bon état, donc l'action n'améliore pas l'état du composant et l'indisponibilité est aggravée à cause du temps hors service.

$$P(SO = \text{non - détection}) = P(Xi = \text{détecté} / Di = \text{non - produite}) \\ \times P(AM^p = \text{conditionnelles}) \times P(AM = \text{préventive}).$$

Cette probabilité est attribuée aux tâches correctives en supposant que les composants tombent en panne dû à une non-détection.

Où : X_i : sont les variables du système d'observation

D_i : sont les variables de défaillance.

AM^p : fait références aux actions de maintenance préventive. Elles sont spécifiées par trois modalités : conditionnelle, prévisionnelle ou systématique.

De cette façon la TPC du type de maintenance corrigé est modifiée telle que montré sur le Tableau 1. Pour les fausses alarmes, la TPC est modifiée sur le nœud « pertinence du plan de maintenance », tel que montré sur le Tableau 1 en italique.

Fiabilité système d'observation	Type de maintenance	Corrective	Préventive
Fausse alarme	Corrective	1	0
Fausse alarme	Préventive	0	1
Non-détection	Corrective	1	0
<i>Non-détection</i>	<i>Préventive</i>	<i>0,063</i>	<i>0,937</i>
Détection	Corrective	1	0
Détection	Préventive	0	1

Tableau 1. TPC nœud "type de maintenance corrigé"

- **Nœud « Pertinence du plan de maintenance »** (Figure 3, « Point D ») :

L'efficacité d'une action peut être totale, partielle ou imparfaite. L'efficacité imparfaite est modélisée comme une intervention située entre ces deux extrêmes. Elle impacte l'âge effective du composant suite à une intervention de maintenance à travers un facteur de rajeunissement X_{Raj} qui est borné entre $0 \leq X_{Raj} \leq 1$ [18]. Nous faisons l'hypothèse que la proportion de réduction de l'âge est équivalente à un effet de restauration totale ($p = X_{Raj}$) et son complément ($q = 1 - X_{Raj}$) est équivalent à un effet de restauration partielle (q). Nous regroupons les actions en restauration partielle ou totale. Pour associer la maintenance imparfaite aux états « totale » ou « partielle », la somme des efficacités est utilisée comme une pondération pour répartir le total de probabilité relative aux actions imparfaites. Finalement les attributions des probabilités aux états seront :

$$P(\text{efficacité} = i) = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n P_i + \sum_{i=1}^n Q_i} \times P(\text{efficacité} = \text{imparfaite})$$

Pour $i = p$ (totale) ou q (partielle), où :

$P(\text{efficacité} = i)$: Probabilité attribuées aux actions d'efficacité i

Dans notre exemple nous obtenons que les probabilités pour les actions correctives totales sont 0,5 et 0,5 pour les partielles. Pour la maintenance préventive il est noté que 0,7 ont une efficacité totale, 0,15 ont une efficacité partielle et 0,15 ont une efficacité imparfaite.

Cet exemple présente deux actions imparfaites dans le plan de maintenance, dont les facteurs p et q sont définis ci-dessous :

Action imparfaite i	P_i : (Totale)	Q_i : (Partielle)
Peinture anticorrosive	0,8	0,2
Nettoyage de la résistance	0,6	0,4
Somme =	1,4	0,6

Tableau 1. Actions imparfaites associées à R1

Le facteur p signifie que l'action de maintenance a provoqué une diminution de l'âge « virtuel » du composant. Dans notre exemple, l'action « Peinture anticorrosive » rajeunie ou diminue l'âge du composant à 80%.

Dans cet exemple la répartition des p et q se réalise de la façon suivante :

$$P(\text{efficacité} = \text{totale}) = p = (1,4 / (1,4 + 0,6)) \times 0,15 = 0,105$$

$$P(\text{efficacité} = \text{partielle}) = q = (0,6 / (1,4 + 0,6)) \times 0,15 = 0,045$$

De cette façon la TPC résultante est montrée sur le Tableau 2.

Type de maintenance corrigé	Fiabilité système d'observation	Totale	Partielle
Corrective	Fausse alarme	0,5	0,5
Corrective	Non-détection	0,5	0,5
Corrective	Détection	0,5	0,5
Préventive	Fausse alarme	$0,7 + 0,105 = 0,0021 = 0,8029$	$0,15 + 0,045 = 0,0021 = 0,1971$
Préventive	Non-détection	$0,7 + 0,105 = 0,805$	$0,15 + 0,045 = 0,195$
Préventive	Détection	$0,7 + 0,105 = 0,805$	$0,15 + 0,045 = 0,195$

Tableau 2. TPC nœud "Pertinence du plan de maintenance"

- **Nœud « Facteurs environnementaux »** (Figure 3, « Point E »)

Pour caractériser les facteurs environnementaux, il faut intégrer les conditions d'exploitation de la résistance. La résistance a été exploitée au-dessus du taux d'utilisation prévu par le constructeur et en conséquence $P(E = \text{non-nominale}) = 0,15$

- **Nœud « Resistance_A.initial »** (Figure 3, « Point F »)

Le nœud support_initial contient l'état du composant soumis à un plan de maintenance. La pertinence du plan impacte la remise dans un état amélioré d'un composant, néanmoins, il faut considérer un facteur d'aggravation des états de fonctionnement qui est le temps hors service du à la période de l'intervention (MDT). Pour cela nous avons :

$\alpha 1$ qui est un facteur d'aggravation du fonctionnement du composant. Il est calculé à travers le temps hors service du composant μ_{totale} dans une période du temps t en assumant que le composant n'est soumis qu'à des actions de remplacement, donc $\alpha 1 = \frac{\lambda_{totale}}{\mu_{totale} + \lambda_{totale}}$

Le λ_{totale} est donné par le constructeur où $\lambda_{totale} = \frac{1}{MTTF}$.

$\alpha 2$ est estimé de manière similaire à $\alpha 1$ pour les interventions partielles. Dans ce cas, le nombre d'intervention est calculé à travers le MUT estimé pour des actions minimales. Il faut donc observer dans l'historique le temps de bon fonctionnement suite à une action partielle.

Les facteurs environnementaux impactent uniquement la vitesse du mécanisme de dégradation, et impactent le MUT. Ils existent aussi deux cas : conditions nominales où les conditions n'affectent pas l'état du composant et conditions non-nominales. En effet puisque les conditions sont plus sévères que les conditions normales définies en conception, il faut ajouter un facteur d'aggravation du composant β .

La TPC est définie ainsi sur le Tableau 3.

Pertinence du plan de maintenance	Environnement	Fonctionnement	Non-fonctionnement
Totale	Nominales	$\alpha 1 = 0,9$	$1 - \alpha 1$ $1 - 0,9 = 0,1$
Totale	Non-nominales	$\alpha 1 \times \beta = 0,9 \times 0,85$	$1 - (\alpha 1 \times \beta)$ $= 1 - (0,9 \times 0,85)$
Partielle	Nominales	$\alpha 2 = 0,8$	$1 - \alpha 2$ $0,2$
Partielle	Non-nominales	$\alpha 2 \times \beta$ $= 0,8 \times 0,85$	$1 - (\alpha 2 \times \beta)$ $= 1 - (0,8 \times 0,85)$

Tableau 3. TPC nœud "Resistance_A.initial"

A. Exploitation du modèle

Le modèle résultant construit sur les motifs génériques mais paramétré de façon spécifique au cas traité avec les différentes quantifications précédentes peut maintenant être utilisé pour évaluer la disponibilité du composant soumis à un plan de

maintenance et à certaines conditions d'exploitation, en sachant que la comparaison entre les différentes alternatives en maintenance se fait sur la base de plusieurs simulations et en « réglant » certains des paramètres. Dans l'exemple est mise en évidence que la résistance soumise à ce premier plan de maintenance (configuration initiale des paramètres) et à certaines conditions d'exploitations sera disponible 85,20% du temps (Figure 6- « Point Alt 1 »). Les résultats des simulations de plusieurs scénarios (modifications de paramètres par rapport à la première alternative) sont ensuite présentés.

Alternative 2 : Si les conditions d'exploitations sont améliorées et donc, $P(E = \text{non-nominales}) = 0,05$. La disponibilité augmente de 0,8520 à 0,8651. Ceci permet de conclure quant à l'impact de l'environnement sur une dégradation légère de l'état du composant.

Alternative 3 : Nous pouvons ajouter une deuxième résistance en parallèle avec un même plan de maintenance que R1. Pour cela nous nous basons sur la vue organique (diagramme de fiabilité). Cette modification augmente considérablement la distribution de probabilité sur l'état de bon fonctionnement à 0,9781.

Alternative 4 : Modèle du système - Pour représenter la disponibilité du système nous pouvons utiliser la fonction de structure du système. La

Figure 5 met en évidence que la vanne, le réservoir, la résistance et le pipeline sont en série. De plus nous allons ajouter la R2 en parallèle (comme cela est fait pour l'alternative précédente). De cette façon, nous pouvons intégrer dans le système différents motifs représentatifs du plan de maintenance de chaque composant ainsi que quantifier les paramètres du réseau de façon similaire à la quantification de la résistance R1. La Figure 6 montre le réseau obtenu. Pour les composants en parallèle R1 et R2 nous utilisons dans le TPC un « OU logique » et pour les composants en série un « ET logique ».

En complément à ces premières alternatives, d'autres simulations sont possibles en évaluant l'impact de facteurs complémentaires comme ceux de l'organisation de la maintenance tels que le facteur humain. Toutefois, à ce jour les motifs ne prennent pas encore en compte l'évaluation du coût qui est un des facteurs essentiels de la prise de décision.

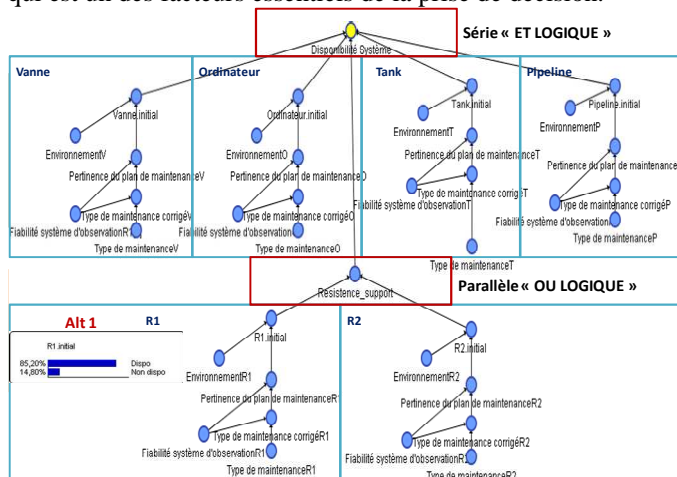


Figure 6. Assemblage des motifs nécessaire pour estimer la disponibilité du système

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Par rapport aux besoins d'évaluations des stratégies de maintenance vis-à-vis de leur impact sur les performances clés du système principal, un modèle unifié des connaissances a été proposé à base de Réseaux Bayésiens et utilisé pour des simulations. Les connaissances modélisées sont issues des points de vue fonctionnel, dysfonctionnel, informationnel et

organique d'un système (maintenance ou principal). La construction du modèle est basée sur des motifs génériques « interconnectables » et qui représentent par exemple l'organisation de la maintenance, le plan de maintenance etc. Ces motifs génériques peuvent être stockés en bibliothèques (composants sur étagère, COTS) et utilisés pour définir un modèle particulier à partir d'une phase de particularisation du motif au cas traité.

Le choix des Réseaux Bayésiens pour la modélisation de ces motifs se justifie par leur capacité à réaliser des prédictions ainsi que du diagnostic. Il est ainsi possible d'estimer l'impact de l'état d'une variable aléatoire (en le propageant par des relations de causes à effets) sur le système.

A partir de la contribution proposée, nos perspectives de travail portent 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. Il est aussi nécessaire d'intégrer dans les motifs actuels, l'évaluation du critère de coût élément majeur de la prise de décision.

En termes de validation, la méthodologie proposée devra aussi être déployée sur un cas industriel réel afin de démontrer son applicabilité après un passage à l'échelle. Ceci est en cours dans le cadre du projet ANR-SKOOB.

VII. REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce papier ont été réalisés dans le cadre du projet ANR-SKOOB. (ANR PROJET 07 TLOG 021 (<http://skoob.lip6.fr>)).

VIII. REFERENCES

- [1] Alsyouf, I. The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. *International Journal of Production Economics*, 105, 70-78. 2007.
- [2] Wang H., A survey of maintenance policies of deteriorating systems, *Eur J Oper Res* 139 (3), pp. 469-489. 2002.
- [3] FD X 60-000, Norme Française. Fonction Maintenance. AFNOR 2002.
- [4] Crespo-Márquez A. The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance, *Springer Series in Reliability Engineering* ISBN-10:1846288207. 2008.
- [5] Dekker R. Applications of maintenance optimization models: review and analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 51:229-40. 1996.
- [6] Parida A. Development of a Multi-criteria Hierarchical Framework for Maintenance Performance Measurement. Doctoral Thesis. Division of Operation and Maintenance Engineering. Luleå University of Technology. 2006.
- [7] Valdez-Flores C, Feldman RM. A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems. *Naval Research Logistics*, 36:419-46. 1989.
- [8] Léger A., Weber P., Levrat E., Duval C., Farret R., Iung B., Methodological developments for probabilistic risk analyses of socio-technical systems. *Journal of Risk and Reliability*, volume 223 (number 4/2009), pages 313-332. 2009.
- [9] Langseth H., Portinale L. (2007). Bayesian networks in reliability. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(1), 92-108.
- [10] Weber, P., Medina-Oliva, G., Simon, C., & Iung, B. (2010). Overview on Bayesian networks Applications for Dependability, Risk Analysis and Maintenance areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence on Dependable System Modelling and Analysis*.
- [11] Association Française d'Ingénierie Système (AFIS). Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système. 2009
- [12] Medina-Oliva, G., Weber, P., Levrat, E., & Iung, B. (2010). *Use of Probabilistic Relational Model (PRM) for Dependability Analysis of Complex Systems*. 12th LSS IFAC symposium Large Scale Systems: theory and applications, Villeneuve d'Ascq, France.
- [13] NF EN 13306. Norme Européen. Terminologie de maintenance. AFNOR 2001.
- [14] Ho-Joon Sung, Optimal maintenance of a multi-unit system under dependencies. PhD. These in the School of Aerospace Engineering Georgia Institute of Technology. 2008.
- [15] Zille V. Modélisation et évaluation des stratégies de maintenance complexes sur des systèmes multi-composants. Doctorat de l'Université de Troyes. 2009.
- [16] Knezevic J. Maintainability and System Effectiveness. - *Handbook of Maintenance Management and Engineering*, Springer Series in Reliability Engineering ISBN978-1-84882-471-3. 2009.
- [17] Mendenhall W, Beaver RJ, Beaver BM: *Introduction to Probability and Statistics*. Brooks/Cole 2008.
- [18] Clavereau J., Labeau P-E. A Petri net-based modelling of replacement strategies under technological obsolescence. *Reliability Engineering and System Safety*. Volume 94, 357-369. 2009.