



HAL
open science

Réseaux bayésiens : méthodologies de modélisation en sûreté de fonctionnement

Philippe Weber, Christophe Simon

► **To cite this version:**

Philippe Weber, Christophe Simon. Réseaux bayésiens : méthodologies de modélisation en sûreté de fonctionnement. AFNOR, IMDR. BIVI Maîtrise des risques, AFNOR, BIVI Maîtrise des risques, pp.1-29, 2013, Articles d'auteur. hal-00905518

HAL Id: hal-00905518

<https://hal.science/hal-00905518>

Submitted on 21 Nov 2013

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.

Réseaux bayésiens : méthodologies de modélisation en sûreté de fonctionnement

WEBER Philippe – Docteur en automatique de l'université de Grenoble, il est actuellement maître de conférences au Centre de recherche en automatique de Nancy (CRAN UMR CNRS 7039). Responsable de l'option Maintenance et sûreté des systèmes à l'ESSTIN, il enseigne dans le domaine de la Sûreté de fonctionnement et de la maintenance. Ses recherches sont focalisées sur l'utilisation de modèles graphiques probabilistes en sûreté de fonctionnement. Animateur du groupe de travail et de réflexion « réseaux probabilistes » de l'IMdR.

SIMON Christophe – Docteur en automatique de l'université Henri Poincaré (Nancy 1), il est actuellement maître de conférences au Centre de recherche en automatique de Nancy (CRAN UMR CNRS 7039). Il est secrétaire du Réseau universitaire francophone pour l'enseignement et la recherche en qualité et sûreté de fonctionnement (RUFEREQ). Animateur du groupe de travail et de réflexion « réseaux probabilistes » de l'IMdR.

1	POURQUOI OPTER POUR LA MODELISATION PAR RESEAU BAYESIEN ?	1
2	MODELISATION PAR RB DANS LE CAS BOOLEEN	3
2.1	SPECIFICATION DES VARIABLES	3
2.2	CONSTRUCTION DU RESEAU BAYESIEN PAR LES LIENS MINIMAUX	5
2.3	CONSTRUCTION DU RESEAU BAYESIEN PAR LES COUPES MINIMALES	7
2.4	CONSTRUCTION DU RESEAU BAYESIEN PAR UNE APPROCHE DESCENDANTE	9
2.5	RESEAU BAYESIEN ET NCEUD PAPILLON	11
3	MODELISATION PAR RB DANS LE CAS MULTI-ETATS	12
3.1	SPECIFICATION DES VARIABLES	12
3.2	CONSTRUCTION DU MODELE RESEAU BAYESIEN PAR LES LIENS MINIMAUX	13
3.3	CONSTRUCTION DU MODELE RESEAU BAYESIEN PAR LES COUPES MINIMALES	17
5	CONSTRUCTION DEPUIS UNE ANALYSE FONCTIONNELLE/DYSFONCTIONNELLE	20
6	CONCLUSION	26
7	RÉFÉRENCES	27

Réseaux bayésiens : méthodologies de modélisation en sûreté de fonctionnement

WEBER Philippe – Docteur en automatique de l'université de Grenoble, il est actuellement maître de conférences au Centre de recherche en automatique de Nancy (CRAN UMR CNRS 7039). Responsable de l'option Maintenance et sûreté des systèmes à l'ESSTIN, il enseigne dans le domaine de la Sûreté de fonctionnement et de la maintenance. Ses recherches sont focalisées sur l'utilisation de modèles graphiques probabilistes en sûreté de fonctionnement. Animateur du groupe de travail et de réflexion « réseaux probabilistes » de l'IMdR.

SIMON Christophe – Docteur en automatique de l'université Henri Poincaré (Nancy 1), il est actuellement maître de conférences au Centre de recherche en automatique de Nancy (CRAN UMR CNRS 7039). Il est secrétaire du Réseau universitaire francophone pour l'enseignement et la recherche en qualité et sûreté de fonctionnement (RUFEREQ). Animateur du groupe de travail et de réflexion « réseaux probabilistes » de l'IMdR.

1 Pourquoi opter pour la modélisation par réseau bayésien ?

L'une des caractéristiques des modèles graphiques probabilistes qui séduit de nombreux analystes est que le modèle peut être construit directement à partir des connaissances développées par l'expérience sans besoin d'une connaissance détaillée des techniques de calcul utilisées. Cependant, cet avantage peut aussi être source de doute sur la validité des résultats obtenus car un modèle graphique probabiliste tel qu'un réseau bayésien (RB) n'est pas par nature formalisé à partir d'une sémantique ou d'un langage graphique spécifique à la sûreté de fonctionnement. Formellement, les résultats sont corrects et la question de la validité ne doit porter que sur le modèle élaboré par l'analyste et/ou sur les données d'entrée, notamment si elles proviennent de l'expertise. Il est donc important de suivre une démarche structurée de modélisation pour élaborer un modèle cohérent et reflétant la réalité.

En sûreté de fonctionnement, il y a souvent peu d'information disponible, particulièrement dans les domaines de fiabilité, de l'analyse de risque et de la maintenance. Il est donc souvent impossible d'obtenir les paramètres décrivant la loi jointe. C'est pourquoi, les outils de modélisation font principalement appel au jugement des experts pour construire des modèles structurés (Celeux *et al.*, 2006). La modélisation par des RB reste dans cette logique. C'est une solution de modélisation puissante pour les systèmes complexes car un RB permet de fusionner des connaissances de natures diverses au sein d'un même modèle : les données de

retour d'expérience, le jugement des experts (qui s'exprime par des règles logiques, des équations ou des probabilités subjectives), le comportement du système étudié (l'analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle) et des observations. De plus, un RB établit des relations de cause à effet entre les variables pour modéliser leurs dépendances. Par exemple, un RB peut modéliser l'effet d'actions humaines de maintenance et l'impact des barrières de défense sur l'analyse de risques de systèmes comme cela est proposé dans (Léger, 2009).

Comme nous l'avons montré dans l'article III-10-80, les réseaux bayésiens sont tout particulièrement adaptés à la modélisation de la fonction de structure des systèmes multi-états. Cette modélisation repose sur des connaissances statistiques qui utilisent une combinaison de données et des connaissances sur les relations causales qualitatives décrivant des dépendances conditionnelles entre les variables. Cette technique est utilisée en sûreté de fonctionnement pour la modélisation de la propagation des événements de défaillance, de dégradation et d'altération du fonctionnement des systèmes (Villemeur, 1988, p. 158 ; Cocozza-Thivent, 1997, p. 231 ; Corazza, 1975, p. 114 ; Gertsbakh, 2000, p. 1).

Il est important de remarquer qu'il existe plusieurs structures de réseaux bayésiens pour un même problème, exactement comme il existe plusieurs représentations par arbre de défaillance ou par diagramme de fiabilité équivalent à une fonction de structure. La structure du modèle graphique probabiliste peut être construite à partir des connaissances telles que les coupes minimales, les chemins de succès, ou une analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle du système comme : SADT (Structured Analysis and Design Technique) – connue aussi sous le label IDEF0 (Integration Definition for Function modeling), AMDEC (Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) et HAZOP (Hazard and Operability Studies). La structure des modèles sera différente selon la technique de construction du modèle, mais les estimations seront identiques si la même information est encodée car les modèles représentent la même loi jointe.

Pour mettre en évidence l'intérêt des réseaux bayésiens pour traiter les problèmes de sûreté de fonctionnement et de maîtrise des risques, nous proposons une série de trois articles exposant les principes de structuration des RB garantissant des modèles valides et, nous illustrons la flexibilité et l'efficacité de la représentation par RB.

- Le premier article, « Réseaux bayésien : un nouveau formalisme de modélisation pour la sûreté de fonctionnement » III-10-80, présente les principes fondamentaux sur lesquels repose la modélisation par réseaux bayésien. Cet article rappelle quelques éléments formels de la modélisation par RB et illustre la flexibilité et l'adéquation de cette méthode à la modélisation de problèmes de sûreté de fonctionnement. Cet article fait le lien entre d'une part la définition de la loi de probabilité jointe décrivant l'ensemble des situations possibles sur un exemple de système didactique et d'autre par la structuration et la définition des paramètres d'un modèle RB du système.
- Le deuxième article, « Réseaux bayésiens : méthodologies de modélisation en sûreté de fonctionnement » III-10-81, présente l'ensemble des méthodes de construction d'un modèle RB en sûreté de fonctionnement. Chaque méthode est appliquée à un exemple didactique d'analyse de fiabilité. Cet article permet de comprendre pourquoi il existe plusieurs structures de modèle et permet de vérifier que, quel que soit la méthode de construction du modèle RB, les résultats restent identiques et cohérents. Cet article présente aussi une méthode originale de construction de modèle multi-état d'un système complexe sur la base d'outils d'analyse fonctionnelle.
- Enfin le troisième article « Réseaux bayésiens : application à l'évaluation de la fiabilité, à la maintenance et à l'analyse intégrée des risques » III-10-82, présente différentes applications des RB sur des cas pratiques de dimension industrielle. Cet article permet

d'illustrer les avantages de la modélisation par RB dans des cas réalistes en partenariat avec des industriels. Les méthodes de structuration de la modélisation ne sont pas exposées dans leurs détails mais sont cohérentes avec les méthodes proposées dans les articles précédents. Trois applications ont été choisies pour couvrir les domaines d'application tels que la fiabilité, la maintenance, et l'analyse des risques.

Comme nous l'avons évoqué précédemment, il est possible d'utiliser plusieurs méthodes de construction du modèle qui conduisent à différentes structures de modèle. Nous présentons dans cet article les liens qui existent entre ces représentations et l'équivalence des RB obtenus quelle que soit la méthode de structuration utilisée. Une bonne méthodologie de modélisation a pour objectif de définir la structure la plus compacte (ou nécessitant le moins de paramètres possibles) tout en respectant l'expertise des analystes de sûreté de fonctionnement.

2 Modélisation par RB dans le cas booléen

2.1 Spécification des variables

La représentation de l'échec de la mission d'un système d'une façon probabiliste représente naturellement l'incertitude aléatoire. Pour une telle représentation, nous considérons le comportement de processus comme une variable aléatoire qui prend ses valeurs dans un espace fini d'états correspondant à ceux du système et de ses composants.

Soit un système constitué de r composants (ou éléments). L'état du système dépend de la configuration des composants selon la fonction de structure. Considérons que les états de fonctionnement et de dysfonctionnement des composants soient représentés par une variable $x_i, i = \{1, \dots, r\}$. Cette variable peut classiquement prendre les valeurs suivantes (Villemeur, 1988, p. 158 ; Coccozza-Thivent, 1997, p. 231) :

$$\begin{cases} x_i = 0 \text{ le composant } i \text{ est en fonctionnement} \\ x_i = 1 \text{ le composant } i \text{ est en panne} \end{cases} \quad (1)$$

Le système est modélisé par une variable y qui prend les valeurs suivantes :

$$\begin{cases} y = 0 \text{ le système est en fonctionnement} \\ y = 1 \text{ le système est en panne} \end{cases} \quad (2)$$

Remarque : les auteurs (Corazza, 1975, p. 114 ; Gertsbakh, 2000, p. 1) utilisent une convention inverse. Nous utilisons cette convention qui permet l'extension aisée aux cas multi-état.

Le système est donc modélisé par une variable booléenne. La fonction de structure ϕ est une fonction binaire liant les états des composants aux états du système et telle que :

$$y = \phi(x) \quad (3)$$

où $x = (x_1, x_2, \dots, x_r)$. La fonction ϕ prend les états 0 si le système fonctionne et 1 si le système est en panne. Cette fonction de structure peut être définie aisément à partir des coupes minimales ou des liens (chemins de succès) minimaux.

Les coupes minimales, notées C_j , sont les scénarios de dysfonctionnement. Elles sont définies à partir des plus petits ensembles de composants en panne qui ne permettent pas au système de fonctionner. Les liens minimaux, notés L_j , sont les scénarios de fonctionnement du système définis à partir des plus petits ensembles de composants en fonction qui permettent le fonctionnement du système (Villemeur, 1988).