

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGUERRA-BOUMERDES  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT MAINTENANCE INDUSTRIELLE  
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLIDES ET DES SYSTEMES



## MEMOIRE DE MAGISTER

FILIERE : MAINTENANCE INDUSTRIELLE  
OPTION : MAINTENANCE DES SYSTEMES MECANIQUES

Intitulé de sujet

*Evaluation prévisionnelle de la sûreté de fonctionnement d'un système industriel utilisé dans un contexte de maintenance dynamique*

Présenté par : AGGAB Toufik

Encadré par : Mr. ADJERID Smaïl

Devant le Jury :

<b>Mr. BENAZZOUZ Djamel</b>	<b>Professeur</b>	UMBB	Président
<b>Mr. BENFDILA Arezki</b>	<b>Professeur</b>	UMMTO	Examineur
<b>Mr. ADJERID Smaïl</b>	<b>Maître de conférences /A</b>	UMBB	Rapporteur
<b>Mr. AKNOUCHE Hamid</b>	<b>Maître de conférences /B</b>	UMBB	Invité

---

## Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein de laboratoire de mécanique des solides et des systèmes (LMSS) à la faculté des sciences de l'ingénieur de l'université de Boumerdès.

Le travail a été dirigé par Monsieur ADJERID Smaïl, à qui je tiens à exprimer ma plus grande et profonde gratitude pour son soutien, ses conseils et pour sa disponibilité. Merci encore pour tout l'intérêt que vous avez porté à mon travail.

Je remercie Monsieur SERIDI Ahcene, Professeur à l'université de Boumerdes, Directeur de Laboratoire de Mécanique des Solides et des Systèmes (LMSS), Monsieur BENAZZOUZ Djamel, Professeur à l'université de Boumerdes, Responsable de la PG « Maintenance Industrielle », pour m'avoir donné l'opportunité de continuer mes études et les conditions de travail qu'ils m'ont apporté au sein du laboratoire, je leurs suis très reconnaissant.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants de la PG.

J'adresse tous mes remerciements pour les membres de jury pour avoir eu la patience de lire ce manuscrit

Monsieur BENAZZOUZ Djamel, Professeur à l'université de Boumerdes pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance, mais également pour tous les conseils qu'il m'a donné, qu'il trouve ici le témoignage de ma reconnaissance.

Monsieur BENFDILA Arezki, Professeur à l'université de Tizi Ouzou, pour avoir accepté d'examiner mon travail, je le remercie.

Monsieur AKNOUCHE Hamid, Maître de Conférences à l'université de Boumerdes, pour avoir accepté l'invitation de participer à mon jury, je le remercie.

Je ne saurais terminer cette page, sans adresser mes remerciements à tous mes amis, (trop nombreux, je ne peux les citer tous), et souhaiter bonne chance à chemseddine, mahdi et à tous les Posts Graduant du laboratoire.

Et bien sûr, ceux sans qui je ne serais rien : Mes parents,

Mes frères, qui me soutiennent depuis toujours

---

## Résumé

L'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels est devenue un enjeu stratégique pour la performance globale de l'entreprise, actuellement le processus de maintenance est considéré comme l'un des principaux leviers d'action sur la performance des systèmes industriels. La complexité des systèmes conçus rend le problème d'évaluation sortir de contexte combinatoire des premiers approches et méthodes pour recourir à un formalisme de la fiabilité dynamique. L'utilisation de formalisme des réseaux bayésiens dynamiques (RBD) est alors une approche candidate pertinente. Effectivement sa flexibilité, sa facilité d'utilisation et d'aide à la décision apportée constituent un outil efficace et précieux. Nous illustrons l'approche sur un problème d'estimation des indicateurs de sûreté d'un système industriel.

Mots clés : évaluation, sûreté de fonctionnement, fiabilité dynamique, réseau bayésien dynamique, maintenance.

## Abstract

The evaluation of dependability of systems industries has become a strategic issue for overall performance of the company; currently the maintenance process is considered one of the main levers on the performance of industrial systems. The complexity of the systems designed makes the problem valuation exit of context of the first approaches and combinatorial methods to use a formalism of dynamic reliability. Use the formalism of Dynamic Bayesian Networks (DBN) is then a pertinent candidate approach. Actually its flexibility, ease of use and decision support provided, constitute an effective and valuable tool. We illustrate the approach on a problem of estimating safety indicators of an industrial system.

Keywords: evaluation, dependability, dynamic reliability, Dynamic Bayesian Networks, maintenance

## ملخص

إن تقييم موثوقية النظم الصناعية أصبحت قضية إستراتيجية بالنسبة للأداء العام للشركة, حاليا تعتبر عملية الصيانة واحدة من الأدوات الرئيسية في أداء النظم الصناعية. تعقيد الأنظمة المصممة في الوقت الراهن يجعل مشكلة التقييم تخرج سياق النهج التوافقي والأساليب الأولى لاستخدام شكلية من الموثوقية الدينامكية. استخدام شكلية شبكية بيز الدينامكية تعتبر نهج مرشح ذات الصلة, إن مرونته وسهولة استخدام شبكية بيز ودعم القرارات المقدمة تشكل أداة فعالة وقيمة. سنبيين النهج لمشكلة تقدير مؤشرات السلامة للنظام الصناعي.

كلمات السر: تقييم, موثوقية, موثوقية الدينامكية, شبكية بيز الدينامكية, الصيانة.

---

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels</b>	
<b>I. Définitions</b> .....	2
I. 1. Maintenance.....	2
I. 2. Sûreté de fonctionnement .....	2
I. 3. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement.....	3
<b>II. Prévion de la sûreté de fonctionnement</b> .....	5
II. 1. Méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement.....	6
II. 2. Problématique de sûreté de fonctionnement et de fiabilité dynamique.....	7
II. 2. 1. Fiabilité dynamique.....	8
II. 2. 2. Méthodes et outils pour la fiabilité dynamique.....	8
<b>III. Impact de la maintenance sur la sûreté de fonctionnement</b> .....	11
<b>Conclusion</b> .....	13
<b>Chapitre II : Réseaux Bayesiens</b>	
<b>I. Présentation des réseaux bayesiens</b> .....	14
<b>II. Modélisation et Inférence par Réseaux Bayesiens</b> .....	16
II. 1. Apprentissage de la structure.....	16
II. 1. 1. Avis d'experts.....	16
II. 1. 2. Apprentissages par base de données.....	16
II. 2. Apprentissage des paramètres.....	17
II. 2. 1. Apprentissage d'une base de données.....	17
II. 2. 2. Avis d'expert.....	18
II. 3. Inférence dans un réseau bayésien.....	20
<b>III. Extension des réseaux bayésien</b> .....	20
III. 1. Les diagrammes d'influence.....	21
III. 2. Les réseaux bayésiens orientés objets.....	22
III. 3. Les réseaux bayésien dynamique.....	23
<b>VI. Application des réseaux bayesiens dans la sûreté de fonctionnement et la maintenance</b> .....	24
<b>Conclusion</b> .....	25

## Chapitre III : Approche analytique

<b>I. Présentation générale de l'approche</b> .....	26
I. 1. Etapes de la méthodologie .....	26
I. 2. Présentation de l'approche.....	26
I. 2. 1. Modélisation de la dégradation d'un système.....	26
I. 2. 2. Modélisation des dépendances fonctionnelles entre les composants.....	28
I. 2. 3. Modélisation des stratégies de maintenance.....	29
I. 3. Exploitation du modèle.....	29
I. 4. Modélisation du système.....	31
<b>II. Présentation du système industriel</b> .....	33
II. 1. Choix de l'équipement.....	33
II. 2. Fonctionnement de la souffleuse.....	34
II. 2. 1. Processus de transfert.....	34
II. 2. 2. Processus de soufflage.....	36
II. 3. Décomposition de la machine.....	37
<b>Conclusion</b> .....	43

## Chapitre IV : Application

<b>I. Modélisation du comportement du système sans intervention de la maintenance</b> ....	44
I. 1. Modélisation de la dégradation des composants.....	44
I. 2. Modélisation des dépendances fonctionnelles entre les composants.....	46
I. 3. Réseau global.....	53
I. 4. Conclusion.....	57
<b>II. Modélisation du comportement du système avec intervention de la maintenance</b> .....	56
II. 1. Identification des différentes stratégies.....	57
II. 2. Intégration des stratégies.....	59
II. 3. Réseau global.....	63
II. 4. Conclusion.....	67
<b>III. Possibilités d'exploitation du réseau</b> .....	67
III. 1. Diagnostic.....	67
III. 2. Prédiction.....	70
III. 3. Raisonnement mixte.....	74
<b>Conclusion</b> .....	76

<b>Conclusion générale et Perspectives</b> .....	77
<b>Références bibliographiques</b> .....	I
<b>Annexe</b> .....	II

Liste des Tableaux

<i>Tabl. II. 1. Table de Probabilités du nœud <math>X^1</math>.....</i>	15
<i>Tabl. II. 2. Table de Probabilités conditionnelles (TPC) du nœud <math>X^4</math>.....</i>	15
<i>Tabl. II. 3. Echelle de probabilité.....</i>	19
<i>Tabl. III. 1. Table de Probabilités conditionnelles (TPC).....</i>	28
<i>Tabl. III. 2. Table de Probabilités conditionnelles (TPC) du nœud <math>X_{t+1}^i</math>.....</i>	29
<i>Tabl. III. 3. Nomenclature des composants de la roue de soufflage.....</i>	36
<i>Tabl. III. 4. Nomenclature des composants du mandrin .....</i>	42
<i>Tabl. IV. 1. Fonction et modes de défaillance des composants et sous systèmes.....</i>	44
<i>Tabl. IV. 2. Etats et taux de défaillance intrinsèque des composants et sous systèmes....</i>	45
<i>Tabl. IV. 3. Table de probabilité conditionnelle du nœud four <math>t_{+1}</math>.....</i>	45
<i>Tabl. IV. 4. Présentation des dépendances fonctionnelles.....</i>	46
<i>Tabl. IV. 5. Table de probabilité conditionnelle de la roue de soufflage <math>t_{+1}</math>.....</i>	48
<i>Tabl. IV. 6. Valeurs de la fiabilité et de bon fonctionnement.....</i>	49
<i>Tabl. IV. 7. Table de probabilité conditionnelle du nœud mandrins <math>t_{+1}</math>.....</i>	50
<i>Tabl. IV. 8. Table de probabilité conditionnelle du four <math>t_{+1}</math>.....</i>	50
<i>Tabl. IV. 9. Valeurs de la fiabilité et de bon fonctionnement.....</i>	52
<i>Tabl. IV. 10. Présentation de l'effet de défaillance des composants sur la machine.....</i>	53
<i>Tabl. IV. 11. L'efficacité des tâches de maintenance de remise en état.....</i>	58
<i>Tabl. IV. 12. Les types d'actions associées aux composants.....</i>	58
<i>Tabl. IV. 13. Table de probabilité conditionnelle du nœud roues <math>t_{+1}</math>.....</i>	59
<i>Tabl. IV. 14. Table de probabilité conditionnelle associée au nœud four <math>t_{+1}</math>.....</i>	62
<i>Tabl. IV. 15. Probabilités des variables (diagnostic).....</i>	67
<i>Tabl. IV. 16. Probabilités des variables (prédiction).....</i>	70
<i>Tabl. IV. 17. Probabilités des variables (prédiction avec stratégie).....</i>	70
<i>Tabl. IV. 18. Probabilités des variables (raisonnement mixte).....</i>	74

Table des Figures

<i>Fig. I. 1. Représentation des paramètres temporels moyens.....</i>	4
<i>Fig. I. 2. Un modèle markovien.....</i>	9
<i>Fig. I. 3. Intensités de défaillance selon la stratégie de maintenance.....</i>	12
<i>Fig. I. 4. Relation entre le système et la maintenance [Zille, 2009].....</i>	13
<i>Fig. II. 1. Exemple de RB.....</i>	15
<i>Fig. II. 2. Exemple: diagramme d'influence.....</i>	22
<i>Fig. II. 3. RBOO générique représentant les nœuds d'entrée et de sortie.....</i>	22
<i>Fig. II. 4. Exemple RBOO exploitant la sous structure1.....</i>	23
<i>Fig. II. 5. Réseau bayésien dynamique déroulé sur 4 pas de temps.....</i>	23
<i>Fig. II. 6. Exemple de RBD (ordre et inférence).....</i>	24
<i>Fig. III. 1. Topologie décrivant la dégradation d'un composant.....</i>	27
<i>Fig. III. 2. Exemple d'un modèle de dégradation d'un système formé par 2 composants</i>	28
<i>(a) composants fonctionnellement indépendants,</i>	
<i>(b) composants fonctionnellement dépendants.</i>	
<i>Fig. III. 3. Intégration des actions de maintenance (stratégie).....</i>	29
<i>Fig. III. 4. Exemple "Native Fish" présentant les différentes façons d'exploiter un</i> <i>réseau (Nicholson and Woodberry, 2010) [Nicholsona et Floresb, 2011].....</i>	30
<i>Fig. III. 5. Les étapes de l'approche.....</i>	32
<i>Fig. III. 6. Ligne de production (SIG).....</i>	33
<i>Fig. III. 7. Vue de dessus de la souffleuse.....</i>	35
<i>Fig. III. 8. Trajet des mandrins et des roues de transfert (Processus de transfert).....</i>	35
<i>Fig. III. 9. Roue et module de soufflage.....</i>	36
<i>Fig. III. 10. Décomposition de la souffleuse.....</i>	37
<i>Fig. III. 11. Vue de dessus du four linéaire.....</i>	38
<i>Fig. III. 12. Roue de chargement/déchargement.....</i>	39
<i>Fig. III. 13. Roue de transfert I.....</i>	39
<i>Fig. III. 14. Roue de transfert II.....</i>	39
<i>Fig. III. 15. Roue de transfert III.....</i>	40
<i>Fig. III. 16. Système d'alimentation en air.....</i>	41
<i>Fig. III. 17. Le mandrin de transport et ses composants.....</i>	42

<i>Fig. IV. 1. Topologie indiquant la dégradation du four. ....</i>	45
<i>Fig. IV. 2. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement du four...</i>	46
<i>Fig. IV. 3. Topologie indiquant la dégradation de la roue de soufflage avec ses dépendances fonctionnelle.....</i>	47
<i>Fig. IV. 4. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement de la roue de soufflage et de ses deux dépendances sur l'intervalle [0,100h].....</i>	48
<i>Fig. IV. 5. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement de la roue de soufflage et de ses deux dépendances sur l'intervalle [0,1000h].....</i>	49
<i>Fig. IV. 6. Topologie indiquant la dégradation du four et des mandrins avec leurs dépendances fonctionnelles .....</i>	50
<i>Fig. IV. 7. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement du four et des mandrins avec leurs dépendances [0.100h].....</i>	51
<i>Fig. IV. 8. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement du four et des mandrins avec leurs dépendances sur l'intervalle [0 ,1000h].....</i>	52
<i>Fig. IV. 9. Topologie représentant le modèle global .....</i>	54
<i>Fig. IV. 10. Présentation de modèle global sous logiciel Netica.....</i>	55
<i>Fig. IV. 11. Modèle global obtenu avec le logiciel Netica .....</i>	56
<i>Fig. VI. 12. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement de la souffleuse et du taux de rebut.....</i>	56
<i>Fig. IV. 13. Topologie indiquant l'évolution des roues en prenant en compte les effets des actions de maintenance qui lui sont associées .....</i>	59
<i>Fig. IV. 14. Présentation du modèle de la figure IV.13 avec le logiciel Netica.....</i>	60
<i>Fig. VI. 15. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement des roues avec et sans intervention de la maintenance.....</i>	60
<i>Fig. IV. 16. Topologie indiquant l'évolution de l'état du four en prenant en compte les effets des actions de maintenance qui lui son associées .....</i>	61
<i>Fig. IV. 17. Présentation du modèle de la figure IV.16 avec le logiciel Netica.....</i>	62
<i>Fig. IV. 18. Topologie représentant le modèle global sous Netica.....</i>	64
<i>Fig. IV. 19. Topologie représentant le modèle global avec les modalités des nœuds .....</i>	65
<i>Fig. VI. 20. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon marche de la souffleuse, selon la stratégie appliquée .....</i>	66
<i>Fig. VI. 21. Exemple de diagnostic à t=1heure .....</i>	68
<i>Fig. VI. 22. Exemple de diagnostic à t=9heure .....</i>	69

## Table des Figures

---

<i>Fig. VI. 23. Exemple de prédiction sans intervention de la maintenance .....</i>	72
<i>Fig. VI. 24. Exemple de prédiction avec une stratégie de maintenance .....</i>	73
<i>Fig. VI. 25. Exemple de raisonnement mixte .....</i>	75
<i>Fig. A. 1. Arbre de conséquence.....</i>	II-1
<i>Fig. A. 2. Exemple de statecharts.....</i>	II-4

---

# Introduction Générale

La complexité croissante des organisations et systèmes industriels et la recherche récurrente d'une meilleure compétitivité forcent les entreprises et gestionnaires d'équipements à une évaluation systématique et quasi continue des performances. Celles-ci sont multidimensionnelles, déclinées suivant des attributs de coût, qualité, délai, ..., des critères de productivité, flexibilité, robustesse, ..., des aspects environnementaux, sociaux, sociétaux, ..., elles doivent être évaluées sur l'ensemble du cycle de vie du système ou des produits réalisés. Cette diversité, motivée par une logique socio-économique de développement durable, génère un besoin fort en méthodologies, techniques et outils pour aider aux choix des décideurs dans les phases de conception, de développement ou d'exploitation des produits et systèmes.

La sûreté de fonctionnement est progressivement devenue partie intégrante de l'évaluation des performances des systèmes industriels. En effet, les pannes d'équipements, les pertes de production consécutives, et la maintenance des installations ont un impact économique majeur dans les entreprises. Il est donc essentiel pour un manager de pouvoir estimer de manière cohérente et réaliste les coûts de fonctionnement de l'entreprise, en tenant notamment compte des caractéristiques fiabilistes des équipements utilisés, ainsi que des coûts induits entre autres par le non-fonctionnement du système et la restauration des performances de ses composants après défaillance.

L'évaluation de la sûreté de fonctionnement doit être appliquée tout au long du cycle de vie du système, de la spécification à l'exploitation, rappelons que la complexité des systèmes conçus actuellement rend le problème d'évaluation sortir de contexte combinatoire des premières approches et méthodes pour entrer dans celui de contexte dynamique.

Dans notre travail nous nous intéresserons à l'évaluation prévisionnelle de la sûreté de fonctionnement d'un système industriel en tenant compte des effets des stratégies de la maintenance. Les travaux réalisés dans cette thèse, ont été structurés en quatre chapitres.

Le premier chapitre, est dédié aux concepts et notions théoriques de la sûreté de fonctionnement, avant de ce placer dans le contexte de la fiabilité dynamique où les différentes méthodes et outils sont présentés, en plus de l'outil choisit en l'occurrence le formalisme des réseaux bayesiens.

Le second chapitre est consacré à la présentation des réseaux bayesiens, il décrit la modélisation et l'inférence ainsi que les différents extensions de ces réseaux, leur champs d'application dans le domaine de la sûreté de fonctionnement et de maintenance y sont aussi exposés.

La méthodologie adoptée fait l'objet du troisième chapitre, il comporte les différents étapes de la méthodologie, en plus de la présentation de l'équipement industriel choisit pour l'application.

Le quatrième chapitre est la phase pratique de notre travail, il consiste en l'application de la méthodologie présentée dans le troisième chapitre. Les résultats et les commentaires y sont exposés.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives pour la continuité de ce travail.

CHAPITRE

**I**

---

**Sûreté de fonctionnement des systèmes  
industriels**

Tout au long de leur vie opérationnelle, les systèmes industriels sont soumis à des opérations de maintenance préventive et corrective afin de les conserver en état de marche, tout en justifiant d'un certain nombre de contraintes de sûreté de fonctionnement (*SdF*).

La sûreté de fonctionnement de ces systèmes dépend naturellement étroitement de l'efficacité de ces opérations de maintenance. Ainsi, une évaluation prévisionnelle réaliste de la sûreté de fonctionnement dans la phase d'exploitation de système industriel nécessite la prise en compte des effets des opérations de maintenance. Afin de répondre à cette problématique, nous rappellerons dans un premier temps quelques définitions en plus des principales méthodes classiques d'évaluation de la sûreté de fonctionnement, ensuite on se placera dans le contexte de la fiabilité dynamique où nous exposerons les différentes méthodes et outils, par la suite on introduira l'impact de la maintenance sur la *SdF* du système avant de terminer par le choix de l'outil qui permet de répondre à la problématique de notre travail.

## I. Définitions

Les définitions ci-dessous portent sur les principaux concepts de la maintenance.

**I. 1. Maintenance** (AFNOR X60-010-1994) : ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management.

On distingue 2 formes de maintenance classées en fonction d'événement prévu et de l'état matériel

**Maintenance corrective** (AFNOR X 60-010-1994) : ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien ou la dégradation de sa fonction, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement.

**Maintenance préventive** (AFNOR X 60-010-1994) : maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou de dégradation d'un service rendu.

**I. 2. Sûreté de fonctionnement** : la sûreté de fonctionnement (*SdF*) est un ensemble d'outils et de méthodes qui permettent, dans toutes les phases de vie d'un produit, de s'assurer que celui-ci va accomplir la (les) mission(s) pour laquelle (lesquelles) il a été conçu, et ce, dans des conditions de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et de sécurité bien définies. La *SdF* doit être prise en compte tout au long du cycle de vie du produit [Sadou, 2007].

Villemeur [Villemeur, 1988] définit la sûreté de fonctionnement comme la science des défaillances. Elle inclut ainsi leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maîtrise. Au sens strict, elle est l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données.

Selon [Laprie et al, 2004], la sûreté de fonctionnement d'un système est son aptitude à délivrer un service de confiance justifiée. Cette définition mettant l'accent sur la justification de la confiance, cette dernière peut être définie comme une dépendance acceptée, explicitement ou implicitement. La dépendance d'un système vis-à-vis d'un autre système est l'impact, réel ou potentiel, de la sûreté de fonctionnement de ce dernier sur la sûreté de fonctionnement du système considéré.

Ces définitions sont cohérentes entre elles et leur conjugaison fournit une image plus complète de la *SdF* prise selon plusieurs points de vue.

Par ailleurs, au sens de la norme *CEI 50 191* [Perez Castaneda, 2009], la sûreté recouvre les concepts de la fiabilité, maintenabilité et disponibilité (ou FMD). L'équivalent Anglo-Saxon est le terme *dependability* (reliability, maintainability, availability - RAM), la sécurité est souvent traité à part. Cependant l'acronyme RAMS (FMDS en français) est utilisé pour désigner l'ensemble des activités liées à ces quatre concepts.

**Fiabilité** : est l'aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée. Elle est caractérisée par la probabilité  $R(t)$  que l'entité  $E$  accomplisse ces fonctions, dans les conditions données pendant l'intervalle de temps  $[0, t]$ , sachant que l'entité n'est pas en panne à l'instant 0.

$$R(t) = P [E \text{ non défaillant sur } [0, t]] \quad (I. 1)$$

Pour certains appareils, il peut être plus judicieux de prendre une autre variable : nombre de cycles d'ouverture-fermeture pour un relais, nombre de tours pour un moteur, nombre de kilomètres pour une voiture, etc.

**Disponibilité** : est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir les fonctions requises dans les conditions données et à un instant donné. Elle est caractérisée par la probabilité  $A(t)$  que l'entité  $E$  soit en état, à l'instant  $t$ , d'accomplir les fonctions requises dans des conditions données.

$$A(t) = P [E \text{ non défaillant à l'instant } t] \quad (I. 2)$$

**Maintenabilité** : est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est réalisée dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits. Elle est caractérisée par la probabilité  $M(t)$  que l'entité  $E$  soit en état, à l'instant  $t$ , d'accomplir ses fonctions, sachant que l'entité était en panne à l'instant 0.

$$M(t) = P [E \text{ est réparable sur } [0, t]] \quad (I. 3)$$

**Sécurité** : est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. Elle est caractérisée par la probabilité  $S(t)$  que l'entité  $E$  ne laisse pas apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

$$S(t) = P [E \text{ évite des événements critiques ou catastrophiques sur } [0, t]] \quad (I. 4)$$

### I. 3. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement

On entend par métriques de la sûreté de fonctionnement les grandeurs qui lui sont associées, elles sont calculées à partir des mesures de probabilités, elles peuvent être en fonction du temps (*Ex* :  $R(t)$ ,  $\lambda(t)$ ), ou être caractérisées par des durées moyennes (*Ex* : *MMTR*, *MTBF*).

#### Paramètres temporels moyens

Les paramètres temporels sont relatifs aux probabilités d'occurrences des divers événements comme les défaillances et les réparations de système. Ils se définissent en fonction de l'état de fonctionnement : avant défaillance, entre défaillance, entre défaillance et réparation, etc.

*MTTF* (mean time to failure) : durée moyenne de fonctionnement avant défaillance, espérance mathématique de la durée de fonctionnement avant défaillance.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (I. 5)$$

*MTBF* (mean time between failures) durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée.

*MTTR* (mean time to repair or restoration) durée moyenne de panne ou moyenne des temps pour la remise en état de fonctionnement, espérance mathématique de la durée de panne.

*MTTR<sub>rep</sub>* est associé à sa restauration.

La différence entre les deux est liée au fait que l'on considère ou non le temps mis pour remettre en service l'équipement, *le MTTR<sub>res</sub>* l'incluant.

*MUT* (mean up time) ou *TMD* temps moyen de disponibilité, espérance mathématique de la durée de disponibilité.

*MDT* (mean down time) ou *TMD* temps moyen d'indisponibilité, espérance mathématique de la durée d'indisponibilité.

*Le MDT* est décomposé en plusieurs phases lesquelles sont montrées par la figure suivante.

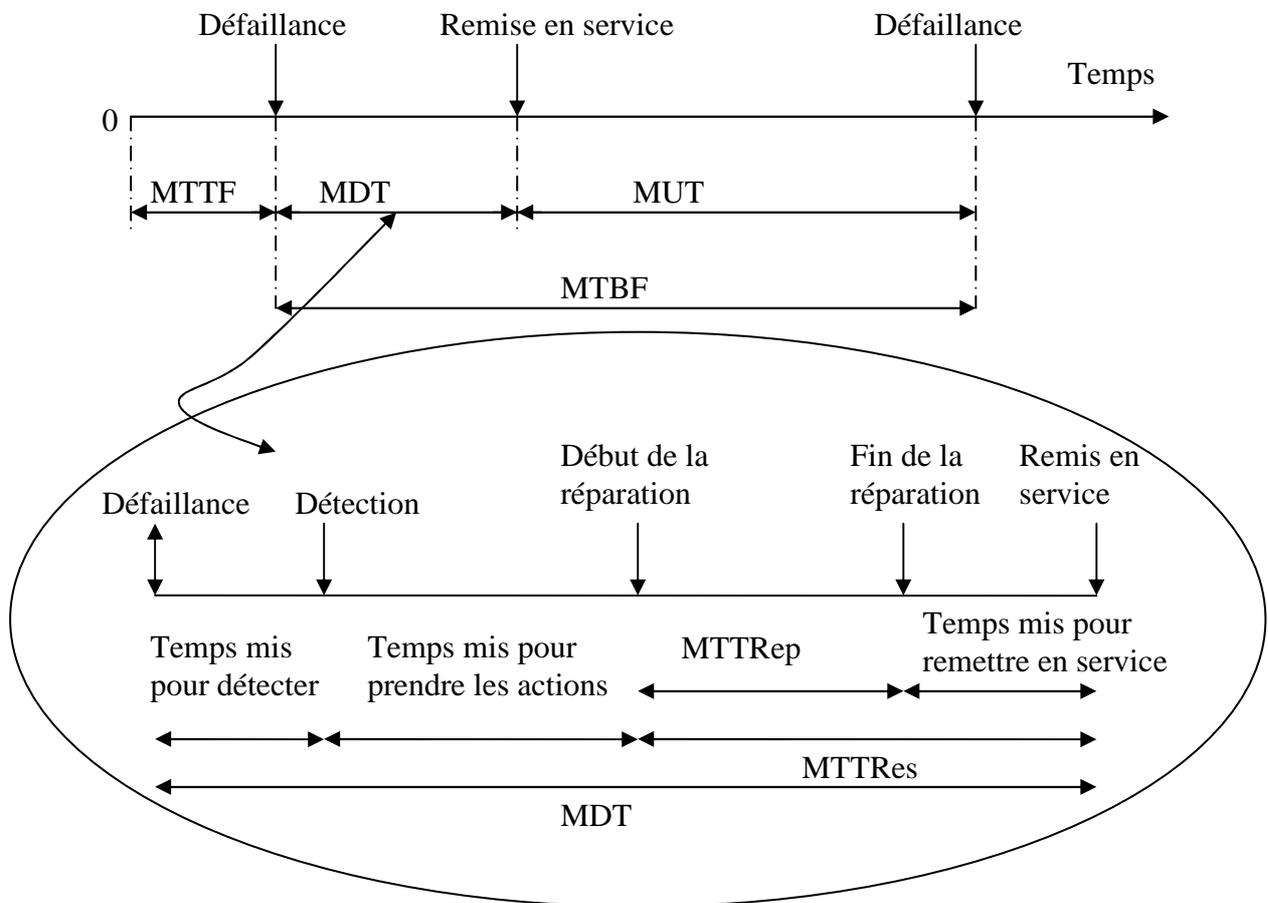


Fig. I. 1. Représentation des paramètres temporels moyens.

### Taux de Défaillance et Taux de Réparation

La défaillance est l'altération de la fonction requise du bien. Elle peut être partielle ou totale. Dans les deux cas son apparition nécessite un temps d'intervention. Ce temps d'intervention est composé de tous les temps des différentes actions nécessaires à réaliser du déclenchement de la défaillance jusqu'à la remise en bon état du bien.

Taux de défaillance instantané [Schoenig, 2004] : C'est la limite, quand elle existe, du quotient de la probabilité conditionnelle pour que l'instant  $T$  d'une défaillance d'une entité  $E$  soit compris dans un intervalle de temps donné  $[t, t+\Delta t]$ , par la durée de l'intervalle de temps, lorsque  $\Delta t$  tend vers 0 en supposant que l'entité n'a pas eu de défaillance sur  $[0, t]$ .

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{\text{Probabilité} [E \text{ est défaillante entre } t \text{ et } t+\Delta t, \text{ et } E \text{ non défaillante sur } [0, t]]}{\text{Probabilité} [E \text{ non défaillante sur } [0, t]]} \quad (I. 6)$$

Taux de réparation instantané [Schoenig, 2004] : C'est la limite, quand elle existe, du quotient de la probabilité conditionnelle pour que l'instant  $T$  d'achèvement de la réparation d'une entité soit compris dans un intervalle de temps donné  $[t, t+\Delta t]$ , par la durée de l'intervalle de temps, lorsque  $\Delta t$  tend vers 0, en supposant que l'entité a été en panne sur  $[0, t]$ .

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[\text{composant est réparé entre } t \text{ et } t+\Delta t \text{ sachant qu'il était en panne entre } 0 \text{ et } t] \quad (I. 7)$$

## II. Prédiction de la sûreté de fonctionnement

On parle d'analyse prévisionnelle de la sûreté de fonctionnement d'un système selon Villemeur [Villemeur, 1988] lorsque le processus d'analyse est orienté vers l'obtention d'un modèle relatif à une caractéristique de la sûreté de fonctionnement (ex : fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité) du système. Les éléments de ce modèle seront des événements susceptibles de se produire dans le système et son environnement, tels que : des défaillances et des pannes des composants du système, des événements liés à l'environnement, des erreurs humaines dans la phase d'exploitation, etc.

Le modèle permet ainsi de représenter toutes les défaillances (et leurs combinaisons) des composants du système qui compromettent une des caractéristiques de sa sûreté de fonctionnement.

**Système :** un système est défini comme un ensemble d'éléments discrets qui interagissent entre eux. Tout système se caractérise par une ou plusieurs fonctions qu'il doit accomplir. Les éléments définissant un système sont : les fonctions à assurer par le système, l'architecture du système, qui comprend les divers composants mis en jeu et leurs connexions, le système d'exploitation, qui représente les comportements du système durant son fonctionnement, cela comprend les diverses actions en réponse aux événements : cela va de la sollicitation d'un dispositif de sécurité (système d'alarme, mesures de sécurité) aux changements de configurations du système (modes de secours) en passant par les maintenances de certains composants.

## II. 1. Méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement

Les méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement utilisent pour la plus part une décomposition des grands systèmes en sous-systèmes ou composants individuels dont les caractéristiques sont supposées connues.

L'évaluation de la sûreté de fonctionnement d'un système consiste à analyser les défaillances des composants pour estimer leurs conséquences sur le service rendu par le système [Sadou, 2007], [Mkhida, 2008] et [Demri, 2009].

Les principales méthodes utilisées lors d'une analyse de la sûreté de fonctionnement sont : l'Analyse Préliminaire des Risques (*APR*), l'Analyse des Modes de défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités (*AMDEC*), l'Arbre de Défaillance (*AdD*), le Diagramme de Fiabilité (*DdF*).

Avant de procéder à la description des méthodes citées, nous proposons d'introduire à ce niveau la présentation de l'analyse fonctionnelle, étape fondamentale dans tout projet sur l'étude de la sûreté de fonctionnement.

**L'analyse fonctionnelle** (AFNOR NF X 50-151) : l'analyse fonctionnelle est une démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions du produit (matériel, logiciel, processus, service) attendues par l'utilisateur.

Une analyse fonctionnelle, en général, précède une étude de sûreté de fonctionnement. Une première analyse fonctionnelle dite externe permet de définir avec précision les limites matérielles du système étudié, les différentes fonctions et opérations réalisées par le système ainsi que les diverses configurations d'exploitation. L'analyse fonctionnelle interne permet de réaliser une décomposition arborescente et hiérarchique du système en éléments matériels et/ou fonctionnels. Elle décrit également des fonctions dans le système [Medjoudj, 2006], [Sadou, 2007].

**L'Analyse Préliminaire des Risques** : l'Analyse Préliminaire des Risques (*APR*) est une extension de l'Analyse Préliminaire des Dangers (*APD*) (voir annexe) utilisée pour la première fois aux Etats-Unis, au début des années soixante. Depuis, cette utilisation c'est généralisée à de nombreux domaines tels que l'aéronautique, la chimie, le nucléaire et l'automobile. Cette méthode a pour objectifs : d'identifier les dangers d'un système et de définir ses causes, d'évaluer la gravité des conséquences liées aux situations dangereuses et les accidents potentiels.

L'*APR* permet de déduire tous les moyens, toutes les actions correctrices permettant d'éliminer ou de maîtriser les situations dangereuses et les accidents potentiels. Il est recommandé de commencer l'*APR* dès les premières phases de la conception. Cette analyse sera vérifiée, complétée au fur et à mesure de l'avancement dans la réalisation de système. L'*APR* permet de mettre en évidence les événements redoutés critiques qui devront être analysés en détail dans la suite de l'étude de sûreté de fonctionnement, en particulier par la méthode des arbres de défaillances.

**L'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités** : l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (*AMDEC*) est une extension naturelle de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (*AMDE*) utilisée pour la première fois à partir des années soixante pour l'analyse de la sécurité des avions. L'*AMDEC* considère la probabilité d'occurrence de chaque mode de défaillance et la classe de gravité de ces défaillances, mais aussi les classes correspondantes de probabilités d'occurrence plus que les probabilités elles-mêmes. On peut ainsi s'assurer que les modes de défaillance ayant d'importants effets ont des probabilités d'occurrence suffisamment faibles, grâce aux méthodes de conception, aux diverses vérifications et aux procédures de test. Ce type

d'analyse a été largement utilisé par la NASA et a été repris dans de nombreux domaines comme l'automobile.

**Diagramme de Fiabilité :** un Diagramme de Fiabilité (*DdF*) permet le calcul de la disponibilité ou la fiabilité du système modélisé, mais avec les mêmes restrictions qu'un Arbre de Défaillance (*AdD*) qui sera présenté après, voir pires (pas d'événements répétés). Tous les chemins entre l'entrée et la sortie du diagramme décrivent les conditions pour que la fonction soit accomplie. On suppose que les composants n'ont que deux états de fonctionnement (fonctionnement correct ou panne).

**Arbres de Défaillances :** l'analyse par Arbre de Défaillance (*AdD*) est une analyse déductive qui permet de représenter graphiquement les combinaisons d'événements qui conduisent à la réalisation de l'événement redouté. L'arbre de défaillance, dont la racine correspond à l'événement redouté, est formé de niveaux successifs tels que chaque événement soit généré à partir des événements du niveau inférieur par l'intermédiaire d'opérateurs logiques. Le critère d'arrêt de la décomposition arborescente d'un *AdD* est la connaissance que l'on a et l'appréciation de l'intérêt de la poursuite du processus de décomposition.

L'analyse par Arbre de Défaillance peut être uniquement qualitative, par recherche systématique des combinaisons minimales de défaillances entraînant l'apparition de l'événement redouté (*coupes minimales*), afin d'identifier les chemins les plus critiques, et donc d'identifier les points faibles du système. Elle peut aussi être d'ordre quantitative ; dans ce cas, on assigne à chaque événement de base une probabilité d'occurrence pour effectuer le calcul de celle de l'événement redouté.

L'analyse par arbre de défaillance est largement utilisée dans les études de sûreté de fonctionnement car elle caractérise de façon claire les liens de dépendance, du point de vue dysfonctionnement, entre les composants d'un système. Bien que cette méthode soit efficace, elle présente des limites. L'une de ces limites est que l'ordre d'occurrence des événements menant vers l'état redouté n'est pas pris en compte.

D'autres méthodes sont utilisées, elles seront présentées en annexe.

## II. 2. Problématique de sûreté de fonctionnement et de fiabilité dynamique

Une particularité caractérisant de nombreux systèmes industriels est que leurs comportements varient en fonction du temps en raison des interactions entre les composants de ce système ou avec l'environnement. On parle donc de systèmes dynamiques, ce qui rend les méthodes classiques de la sûreté de fonctionnement, comme celles présentées dans le §. II. 1, qui sont statiques, inefficaces. Chaque comportement du système est défini par les lois de la physique qui lui sont propres. Le passage d'un comportement à un autre peut être dû à plusieurs causes : l'intervention humaine, l'action de l'organe de contrôle agissant sous l'influence des variables physiques qui décrivent l'état du système, une discontinuité propre au système ou encore une défaillance de composant [Demri, 2009]. En plus de l'hybridité (continu + événements discrets), il faut aussi tenir compte du caractère stochastique du système imposé par les défaillances des composants ou par les incertitudes sur la connaissance du système [Demri, 2009], [Perez Casandeas, 2009].

L'évaluation des paramètres de la sûreté de fonctionnement nécessite de prendre en compte ce couplage entre processus déterministe (continu et/ou discret) et processus stochastique. C'est le domaine connu sous le nom de *fiabilité dynamique* [Schoenig, 2004], [Sadou, 2007].

## II. 2. 1. Fiabilité dynamique

*Fiabilité dynamique (dynamic reliability)* ou encore *Probabilistic Dynamics* selon Devooght et Smidts (1992a), Smidts et Devooght (1992b), Kermisch et Labeau (2002), est une discipline récente dans la sûreté de fonctionnement [Khelfaoui, 2003], [Medjoudj, 2006].

Kermisch et Labeau (2002) définit cette discipline comme « la partie de sûreté de fonctionnement qui étudie de manière intégrée le comportement des systèmes industriels complexes affectés par une évolution dynamique continue sous-jacente » [Khelfaoui 2003] [Schoenig, 2004], [Medjoudj, 2006], [Sadou, 2007] et [Perez Casandéas, 2009].

Plus tard, Cababaye et Lauheret (2005) [Perez Casandéas, 2009] ont exprimé plus spécifiquement que la fiabilité dynamique recouvre l'évolution de systèmes dont le modèle de fiabilité évolue dans le temps en réponse à des événements aléatoires (une chaîne en redondance froide qui passe à l'état ON lors la défaillance de la chaîne nominale) ou à des changements liés au franchissement de seuils par certaines variables continues inhérentes au systèmes (un mécanisme de contrôle activé dès l'entrée d'un paramètre en zone d'alerte) ou à l'action humaine (actions de contrôle, de pilotage ou de reconfiguration).

Selon Perez Casandéas [Perez Casandéas, 2009] la fiabilité dynamique est l'évaluation prévisionnelle de la fiabilité d'un système dont la structure fiabiliste, ce qui exprime comment la défaillance du système dépend des défaillances de ses composants, évolue dynamiquement dans le temps. On peut donc dire en général que la fiabilité dynamique est le problème de l'évaluation probabiliste de la défaillance d'un système dynamique hybride (système décrit par un ensemble de variables continues et un ensemble d'états discrets interagissant).

Cette fiabilité ou tout paramètre de SdF peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$Q_S(t) = P[S(X(T), \chi(T), V(T)) \subset S_Q]_{0 \leq T \leq t} \quad (I. 8)$$

Cette expression exprime que tout paramètre  $Q$  de la SdF à un instant  $t$  donné, est égal à la probabilité que l'état  $S$  du système dépendant des variables *continues*  $X(T)$ , *discrètes*  $\chi(T)$  et *aléatoires*  $V(T)$ , appartienne au sous ensemble des états caractérisant le paramètre  $Q$ .

En pratique, il est assez répandu d'évoquer le concept de fiabilité dynamique pour décrire l'ensemble des activités d'évaluation prévisionnelle des paramètres Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité et Sécurité d'un système [Ghostine, 2008]. C'est le sens que nous lui donnerons en général dans ce document.

## II. 2. 2. Méthodes et outils pour la fiabilité dynamique

On trouve dans la littérature plusieurs travaux qui présentent de façon générale les différentes méthodes et outils qui ont été développés pour traiter les problèmes de la fiabilité dynamique, et plusieurs classifications ont été proposées.

Perez casandéas [Perez Casandéas, 2009] a fait un rappel et complété l'état de l'art de fiabilité dynamique, et il a proposé la classification suivante : méthodes analytiques, semi analytiques, méthodes de discrétisation et a présenté d'autres méthodes utilisées en dehors de cette classification ; il a aussi souligné que les approches de recherche des séquences d'événements les plus critiques dans le but de réduire l'impact, voire les interdire, s'intègre sous le concept de la fiabilité dynamique.

Une présentation détaillée de tous ces travaux peut être consulté dans [Perez Casandeas, 2009], dans cette thèse nous nous limiterons à la description de quelques méthodes relatives à la fiabilité dynamique des systèmes [Khelifaoui, 2003], [Sadou, 2007], [Ghostine, 2008] et [Demri, 2009].

### Méthodes analytiques et semi-analytiques

Dans le cas des méthodes analytiques, la généralisation des équations de Chapman-Kolmogorov (I. 9) conduit à un système mathématique de très grande taille puisque la densité de probabilité dépend, dans chaque état, d'un grand nombre de variables (les variables physiques et le temps). La résolution analytique de ce système n'est possible qu'au niveau de cas-tests. En ce qui concerne les méthodes semi-analytiques, le but est de résoudre le système d'équation de Chapman-Kolmogorov à l'aide d'une technique numérique classique, mais comme pour les méthodes analytiques, on sera confronté à un problème de taille.

$$\Pi(x, i, t) = \int \Pi(u, i, 0) \delta[x - g_i(t, u) \exp\{-\lambda_i[g_i(s, u)]ds\}] du + \sum_{j \neq i} \int p(j \rightarrow i / u) du * \int_0^t \lambda[x - [g_i(t - \Pi, u)] * \exp\left\{-\int_0^{t-\tau} \lambda_i[g_i(s, u)]ds\right\}] * \Pi(u, j, \tau) d\tau$$

(I. 9)

Plus de détail sur l'équation en annexe.

### Chaîne de Markov

Les chaînes de Markov ou Méthode de l'Espace des Etats (MEE) ont été développés dans les années 1950 pour l'analyse de fiabilité des systèmes réparables. Cette méthode consiste à représenter le comportement d'un système par un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini d'états de fonctionnement et de panne. Un support graphique appelé graphe des états, permet de visualiser les différents états d'un système qui sont représentés par des cercles et reliés entre eux par des arcs orientés, désignant la transition d'états de départ vers des états d'arrivée. Un modèle Markovien est présenté ci-dessous (Fig. I. 2).

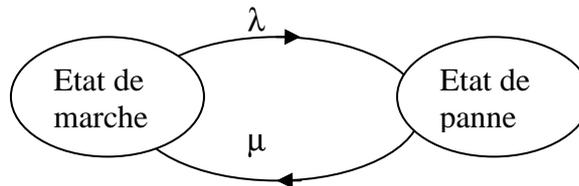


Fig. I. 2. Un modèle markovien.

Pour effectuer cette analyse, il est indispensable dans un premier temps de recenser et de classer tous les états du système (fonctionnement ou panne) et chercher comment passer d'un état à un autre lors d'un dysfonctionnement ou d'une réparation. A chaque transition, de l'état  $E_i$  vers l'état  $E_j$ , est associé un taux de transition  $L_{ij}$  défini de telle sorte que  $L_{ij}.dt$  est égal à la probabilité de passer de  $E_i$  vers  $E_j$  entre deux instants très proches  $t$  et  $t+dt$  sachant que l'on est en  $E_i$  à l'instant de temps  $t$ . Enfin, la dernière étape consiste à calculer les probabilités d'apparition des différents états du système ainsi que les caractéristiques de sûreté de fonctionnement ( $MTTF$ ,  $MTBF$ ,  $MTTR$ , etc).

Les Processus Markoviens Déterministes par morceaux sont présentés dans le but de surmonter les difficultés de la fiabilité dynamique : le système suit une trajectoire déterministe, décrite par exemple à travers une équation différentielle ordinaire, jusqu'à un premier temps de saut arrivant soit spontanément de manière aléatoire, soit quand la trajectoire atteint un seuil. A partir de cet instant, un nouveau point est sélectionné à travers un opérateur aléatoire et le processus repart de ce nouveau point. Entre deux sauts le système suit une trajectoire déterministe. Alors, il existe deux types de saut : déterministes, par

exemple dus à un changement de mode de fonctionnement par le franchissement d'un seuil et stochastiques modélisant les défaillances de composants ou bien les entrées qui modifient le mode de fonctionnement du système. La modélisation avec les graphes de Markov permet de prendre en compte les dépendances temporelles et stochastiques plus largement que les méthodes classiques. En dépit de leur simplicité conceptuelle et leur aptitude à pallier certains handicaps des méthodes classiques, les graphes de Markov souffrent de l'explosion du nombre des états, car le processus de modélisation implique l'énumération de tous les états possibles et de toutes les transitions entre ces états. Ce problème peut se poser même dans le cas de la modélisation du seul aspect dysfonctionnel, mais il devient un handicap énorme si on souhaite rajouter la description de l'aspect fonctionnel à celui de l'aspect dysfonctionnel.

**Les automates :** les automates à états font partie des formalismes très utilisés dans la description des systèmes à événements discrets. A tout changement d'état est associé un événement de l'ensemble des événements possibles. Ce formalisme a été étendu sous la forme des automates hybrides pour modéliser correctement les systèmes dynamiques hybrides. Les automates hybrides sont une extension des automates temporisés informellement, un automate hybride est l'association d'un automate à états finis et d'un ensemble d'équations dynamiques continues pilotées par ce dernier. Les automates stochastiques associent aux événements des taux de probabilité d'occurrence. Le point faible de ce formalisme est, comme les graphes de Markov (qui sont des automates à états stochastiques), l'explosion combinatoire du nombre d'états du graphe. Pour éviter ce problème, dans le cas de la modélisation des systèmes complexes pouvant être découpés en sous-systèmes, il est possible de construire un modèle d'automate pour chacun d'eux et de les composer ensuite pour élaborer l'automate correspondant au système global. La composition se fait soit par synchronisation entre les automates des différents sous-systèmes, soit par messages, soit par variables partagées. En dehors de l'hypothèse markovienne, il est difficile d'utiliser ce formalisme pour une évaluation analytique des performances. Ils peuvent être utilisés comme support de simulation ou comme moyen systématique de recherche de l'ensemble des séquences d'événements menant le système dans des états particuliers, comme par exemple des états dangereux. On recherche alors le langage reconnu par l'automate vis-à-vis de ces états considérés comme terminaux.

**Simulation de Monte Carlo :** la simulation de Monte Carlo est une technique utilisée pour estimer la probabilité de résultats en répétant un grand nombre de fois une expérience à l'aide de la simulation et en utilisant des nombres aléatoires. La simulation est une méthode qui a pour but d'imiter un système réel. La simulation de Monte Carlo est utilisée lorsque d'autres analyses sont mathématiquement trop complexes ou trop difficiles à reproduire.

Un des avantages de la simulation de Monte Carlo est sa faible sensibilité à la complexité et à la taille des systèmes. Cependant, dans le cadre de la sûreté de fonctionnement, le modèle simulé est régi par des événements très rares (les défaillances) et des événements très fréquents (fonctionnement normal du système), et ce, simultanément. La simulation est alors cadencée par de nombreuses occurrences d'événements fréquents qui ne reflètent pas le comportement du système en présence de défaillances. C'est le problème de simulation des événements rares. Un nombre important d'histoires est nécessaire pour voir apparaître un événement redouté, ce qui implique des temps de calcul importants. De nombreuses techniques d'accélération de la simulation permettent de réduire ces temps. Elles sont basées soit sur une diminution de la complexité du modèle, soit sur la réduction du nombre de scénarios à simuler, en favorisant l'apparition des événements rares. Toutefois, ces méthodes ne sont pas toujours faciles à mettre en œuvre, car elles impliquent des hypothèses assez fortes, et/ou ne fournissent pas forcément des estimateurs de qualité.

**Réseaux de Petri** : Les réseaux de Petri sont largement utilisés dans la modélisation des systèmes à événements discrets et dans les études de sûreté de fonctionnement des systèmes dynamiques. Ils se caractérisent par une évolution asynchrone dans laquelle les transitions des composantes parallèles sont franchies les unes après les autres, et par une représentation explicite des synchronisations et des mécanismes d'allocation de ressources. Ces caractéristiques sont très intéressantes pour modéliser les aspects événementiels des systèmes hybrides. A partir du modèle d'origine, maintes extensions ont été proposées afin d'étendre leur pouvoir d'abstraction (pour répondre à la modélisation de problèmes spécifiques) et de structuration (pour maîtriser la taille et la lisibilité des modèles). L'un des atouts indéniables des réseaux de Petri, par rapport aux autres formalismes comme les statecharts (voir annexe), est qu'ils reposent sur des fondements théoriques permettant de vérifier les propriétés générales d'un modèle (vérifier que le modèle est réinitialisable, vivant, sans blocage, borné, etc.) ainsi que l'accessibilité de certains marquages. Les méthodes de recherche de propriétés dans les réseaux de Petri sont basées non seulement sur l'élaboration du graphe des marquages accessibles comme c'est le cas pour les automates, mais aussi sur l'algèbre linéaire (calcul des invariants de places et de transitions), la réduction des réseaux ainsi que sur la logique linéaire. Cette dernière permet de donner une condition nécessaire et suffisante de l'accessibilité entre deux marquages et de caractériser de manière élégante et efficace les relations d'ordre partiel.

**Réseau bayésien** : les réseaux bayésiens (*RB*) sont un formalisme de modélisation probabiliste, ils sont formés d'un graphe orienté sans circuit dans lequel les nœuds représentent les variables d'un système et les arcs représentent les dépendances et les liens entre les variables. Les *RB* possèdent un fort potentiel puisqu'ils sont capables de combiner l'aspect statistique, probabiliste, avec des aspects décisionnels, et des aspects de gestion de connaissances. Initialement apparu dans le domaine de l'intelligence artificielle, les réseaux bayésiens sont devenus une méthode de plus en plus utilisée pour la modélisation probabiliste dans différents domaines, notamment dans le domaine de l'analyse de risques, la sûreté de fonctionnement et la maintenance des systèmes.

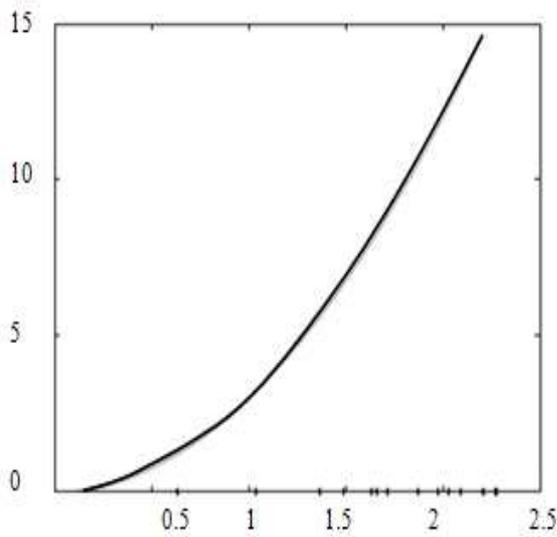
### III. Impact de la maintenance sur la sûreté de fonctionnement

En phase d'exploitation, un système industriel est amené à évoluer physiquement au cours du temps en fonctionnement nominal, en mode dégradé ou défaillant. La maintenance ainsi que l'organisation des processus support qui permettent de faire fonctionner un système ont un impact sur ses performances (qualité, délai, ..., *SdF*...). Il est donc important, pour faire une évaluation de la sûreté de fonctionnement d'un système, de prendre les effets (point de vue efficacité des tâches) de la stratégie de maintenance adoptée.

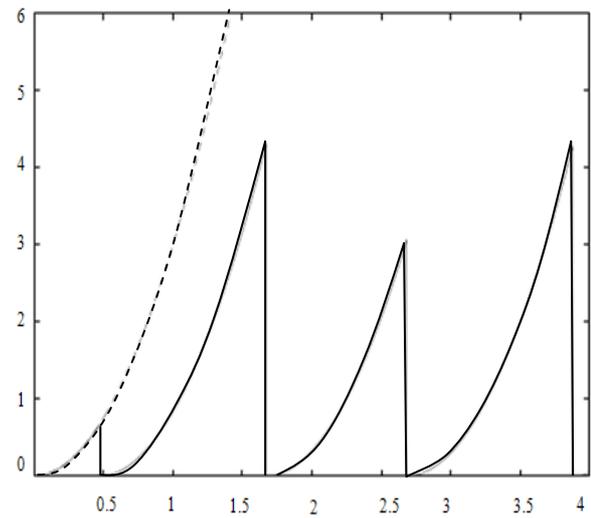
La situation *As Bad As Old (ABAO)* (*Fig. I. 3. a*) signifie que l'efficacité de la maintenance est minimale et la situation *As Good As New (AGAN)* (*Fig. I. 3. b*) qu'elle est maximale. En pratique, on est entre ces deux cas extrêmes. En effet, il est raisonnable de penser que la maintenance a un effet plus que minimal, c'est-à-dire que le système après maintenance est meilleur que vieux ou *Better than Old*. Pour autant, pour des systèmes industriels importants, il est peu vraisemblable que la maintenance remette le système à neuf. Le système après maintenance est donc moins bon que neuf ou *Worse than New*. Ces deux situations se retrouvent parfois dans la littérature sous le nom de réparation meilleure que minimale (*Better than Minimal Repair*) ou plus largement maintenance imparfaite (*Imperfect Maintenance*).

D'un point de vue mathématique, il s'agit de construire des processus ponctuels qui soient intermédiaires entre les processus de Poisson non homogènes et les processus de renouvellement [Doyen et Gaudoin, 2004].

Dans la plupart des modèles, l'efficacité de la maintenance est représentée par un paramètre  $\rho$ . Evaluer cette efficacité revient alors à estimer ce paramètre. Cela peut se faire par des méthodes d'estimation fréquentistes (basées uniquement sur le retour d'expérience) ou bayésiennes (utilisant des avis d'experts). Une synthèse des principaux modèles présentant l'efficacité de la maintenance sont présentées dans [Doyen et Gaudoin, 2004].



a) Intensité dans le cas *ABAO*  $\lambda t = \lambda(t)$



b) Intensité dans le cas *AGAN*  $\lambda t = \lambda(t - TNt)$

*Fig. I. 3. Intensités de défaillance selon la stratégie de maintenance.*

Les instants de défaillance pour le cas *ABAO* sont symbolisés par les étoiles sur l'axe des abscisses alors que pour le cas *AGAN* les instants de défaillance sont les instants de sauts de l'intensité.

## Conclusion

Nous avons présenté quelques méthodes développées à travers différents travaux publiés au cours de ces dernières années afin de traiter et surmonter les problèmes relatifs à l'évaluation prévisionnelle de la *SdF* d'un système industriel. Ces méthodes se différencient en termes d'hypothèses et de modèles de calcul. Cependant, on peut avant toute chose pointer les limites d'utilisation d'approches purement analytique étant donné la complexité et les limites mathématiques. Ceci nous invite à se rapprocher des techniques basées sur la simulation qui favorise la définition de structures de modélisation décrivant à la fois le comportement d'un système et les effets de la stratégie de maintenance appliquée (Fig. I. 4).

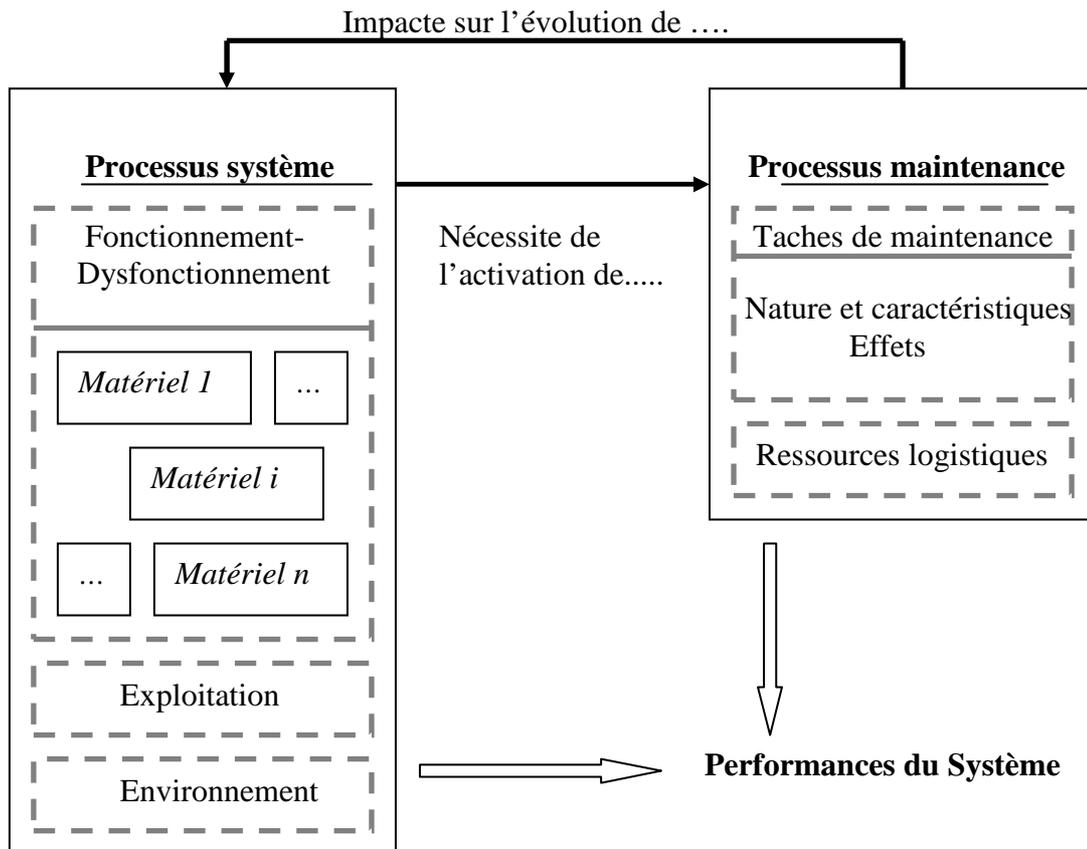


Fig. I. 4. Relation entre le système et la maintenance [Zille, 2009].

A cet effet, nous avons retenu les réseaux bayésiens, ces derniers reposent sur la théorie des graphes et la théorie des probabilités. Ils permettent de représenter intuitivement et parcimonieusement des systèmes dont l'état évolue de manière non déterministe [Donat, 2009]. De plus, ils ont la capacité à intégrer dans le même modèle divers nature de connaissance (Rex, expertise et observation).

La représentation graphique d'un réseau bayésien est explicite, intuitive et compréhensible par un non-spécialiste, ce qui facilite à la fois la validation du modèle, ses évolutions éventuelles et surtout son utilisation, comme on peut se servir du même modèle pour évaluer, prévoir, diagnostiquer, ou optimiser des décisions, ce qui contribue à «rentabiliser» l'effort de construction du réseau [Boumendil, 2010]. Par ailleurs, il existe plusieurs déclinaisons des réseaux bayésiens, le choix de modèle se fait selon la nature du phénomène étudié, la structure de réseau, la disponibilité des informations (raison de confidentialité), etc.

CHAPITRE

**II**

---

**Réseaux Bayesiens**

La formalisation des réseaux bayesiens a débuté il y a 25 ans environ grâce notamment aux travaux de Pearl. Depuis, l'intérêt des réseaux bayesiens dans la communauté de l'intelligence artificielle tout d'abord, puis dans toutes les autres communautés scientifiques, n'a cessé de croître.

Ce chapitre a pour objectif de présenter le formalisme principal de modélisation développé dans cette thèse à partir des réseaux bayesiens. Dans la littérature, il est courant de faire référence à ces derniers sous différentes appellations (ex : modèles graphiques probabilistes orientés, réseaux probabilistes, réseaux de croyances ou encore les réseaux d'indépendances probabilistes). Nous procéderons d'abord à la définition des réseaux bayesiens, à la description de la modélisation et de l'inférence ainsi que des différentes extensions de ces réseaux et enfin leur champs d'application dans le domaine de la sûreté de fonctionnement et de maintenance.

## I. Présentation des réseaux bayesiens

*La formule d'inversion de Bayes (Bayes (1764))*

Pour toute hypothèse  $H$  et toute observation  $e$  :

$P(H)$  étant la probabilité que l'hypothèse  $H$  soit vérifiée indépendamment des données  $e$  (ce terme est également appelé probabilité *a priori*).

$P(e)$  étant la probabilité d'observer les données  $e$  indépendamment de l'hypothèse  $H$  (ce terme est également appelé *évidence*).

$P(e/H)$  étant la probabilité d'observer les données  $e$  sachant que l'hypothèse  $H$  est vérifiée (ce terme est également appelé *vraisemblance (likelihood)*).

La formule de Bayes s'écrit alors de la façon suivante :

$$P(H / e) = P(e / H) \frac{P(H)}{P(e)} \quad (II. 1)$$

Cette formule peut alors être réécrite pour mettre en évidence une proportionnalité :

$$Probabilité \textit{ a posteriori} = Vraisemblance \times Probabilité \textit{ a priori}$$

Sous cette forme, l'équation facilite l'évaluation des probabilités des tâches de diagnostic, de prédiction, ou de classification.

Les réseaux bayesiens ont été nommés ainsi par Judea Pearl (1985) pour mettre en évidence trois aspects [Bellot, 2002], [François, 2006] : la nature subjective des informations, l'utilisation de la règle de Bayes comme principe de base pour la mise à jour des informations et la distinction entre les modes de raisonnement causal et fondé (Bayes, 1764).

Les approches fondées sur le conditionnement et la formule d'inversion de Bayes sont appelées approches bayésiennes. Le nom de réseaux bayesiens est donné par cohérence avec cette appellation. Il est à remarquer, dans ces approches, il n'est pas établi l'obligation d'utiliser des statistiques bayésiennes. Il est possible d'utiliser des réseaux bayesiens fréquentistes.

**Définition :** Le modèle des réseaux bayesiens (*RB*) repose sur l'idée assez naturelle de représenter graphiquement les relations d'influences entre les variables d'un modèle. Un arc unit deux variables lorsqu'il existe une relation d'influence entre elles et l'absence d'arc marque leur indépendance. Le sens de l'arc précise le sens de l'influence à modéliser. L'adjonction au graphe des distributions des probabilités mesure la "force" de cette influence.

Un réseau bayésien donne une description qualitative des relations d'influence entre les variables données par un graphe dirigé sans circuit ainsi qu'une description quantitative de ces relations au moyen d'un ensemble de distributions de probabilités conditionnelles.

D'une manière formelle : un réseau bayésien est défini par les éléments suivants [Corset, 2003] [Godichaud, 2009].

- Un graphe  $G = (N, E)$  orienté acyclique où :
  - $N$  est un ensemble de nœuds ou variables,
  - $E$  est un ensemble d'arcs orientés entre les variables,
- Chaque variable possède un ensemble fini de modalités exclusives,
- Une distribution de probabilité conditionnelle  $P(X/pa(X))$  est associée à chaque variable  $X$  avec  $pa(X)$  l'ensemble des nœuds parents de  $X$ .

Les *nœuds parents (nœuds racine)* : ce sont les nœuds n'ayant aucun arc incident (exemple :  $X^1$  et  $X^2$  sur la Fig. II. 1) et décrits par des distributions de probabilités *a priori, ou marginales*,  $P(X^i)$  stockées dans des tables de probabilités (TP), ex (Tabl. II. 1).

Les *nœuds enfants* : ce sont les nœuds qui ont des parents (exemple :  $X^3$ ,  $X^4$  et  $X^5$  sur la Fig. II. 1). Ils sont décrits par des distributions de probabilités conditionnelles  $P(X^i / pa(X^i))$ , avec  $pa(X^i)$  l'ensemble des parents du nœud  $X^i$ . Les  $P(X^i / pa(X^i))$  sont stockées dans des tables de probabilités conditionnelles (TPC), ex (Tabl. II. 2).

Par ailleurs, la quantification des distributions de probabilités *marginales* et *conditionnelles*, ainsi que les indépendances données par les structures du graphe, définissent une unique distribution de probabilités sur l'ensemble des variables admettant la loi jointe suivante.

$$P(X^1, X^2, \dots, X^n) = \prod_{i=1}^n P(X^i / pa(X^i)) \quad (II. 2)$$

Exemple :

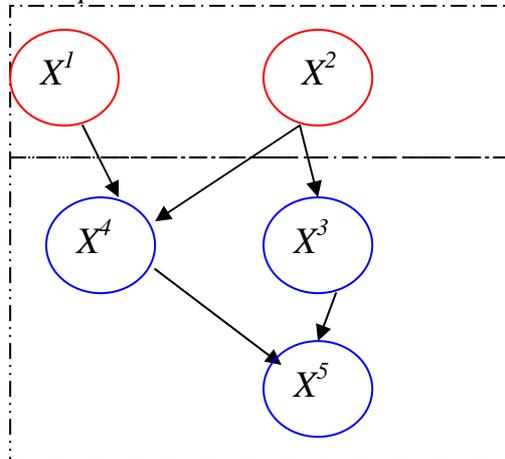


Fig. II.1. Exemple de RB.

Tabl. II. 1. Table de Probabilités du nœud  $X^1$ .

	$x_1^1$	$x_2^1$
$X^1$	$P(X^1 = x_1^1)$	$P(X^1 = x_2^1)$

Tabl. II. 2. Table de Probabilités conditionnelles (TPC) du nœud  $X^4$ .

$X^4$	$x_1^4$	$P(X^4 = x_1^4 / x_1^1, x_1^2)$	$P(X^4 = x_1^4 / x_1^1, x_2^2)$	$P(X^4 = x_1^4 / x_2^1, x_1^2)$	$P(X^4 = x_1^4 / x_2^1, x_2^2)$
	$x_2^4$	$P(X^4 = x_2^4 / x_1^1, x_1^2)$	$P(X^4 = x_2^4 / x_1^1, x_2^2)$	$P(X^4 = x_2^4 / x_2^1, x_1^2)$	$P(X^4 = x_2^4 / x_2^1, x_2^2)$

Avec  $(x_1^1, x_2^1)$ ,  $(x_1^2, x_2^2)$  et  $(x_1^4, x_2^4)$ , les modalités respectives des nœuds :  $X^1$ ,  $X^2$  et  $X^4$ .

## II. Modélisation et Inférence par Réseaux Bayésiens

La modélisation d'un processus stochastique par un *RB* consiste d'abord à définir les variables  $X^i$  du modèle. L'identification de ces variables se fait généralement de façon naturelle et intuitive par un expert qui attribue à chaque variable l'ensemble des états qu'elle peut prendre. Soit  $val(X^i)$  l'ensemble des états du chaque nœud  $X^i$  :

$$val(X^i) = \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_{n_i}^i\} \quad (II. 3)$$

La seconde phase de la modélisation consiste à trouver les liens de dépendance entre les nœuds : c'est la définition de la structure qui peut être construite directement par avis d'experts, ou par apprentissage. Une fois la structure du modèle graphique défini, l'apprentissage des paramètres sert à établir les tables de probabilités conditionnelles. A partir de ces derniers, les probabilités conditionnelles  $P(X^i / X^J = x_k^j)$  sont calculées par inférence en se basant sur calcul des lois jointes.

### II. 1. Apprentissage de la structure

L'objectif de l'apprentissage de structures des *RB* est d'établir la topologie de graphe en identifiant les relations de dépendance entre les nœuds. Pour cela, il existe deux façons différentes de procéder [Leray, 2006] : par avis d'experts ou apprentissage par base de données.

#### II. 1. 1. Avis d'experts

C'est l'approche la plus simple et la plus intuitive de l'apprentissage de structure d'un *RB*. Elle est utilisée pour des modèles où les dépendances traduisent des relations de dépendances clairement identifiables. Par ailleurs, l'expert humain peut distinguer entre deux types de dépendances : les liens qui peuvent être relevés en se basant sur les connaissances *a priori* du système étudié et les liens déduits à partir des modèles formels ou physiques liants les variables aléatoires.

#### II. 1. 2. Apprentissages par base de données

Dans le cas où les relations de dépendance et d'indépendance entre les variables sont difficilement discernables, on recourt aux méthodes d'apprentissage de la structure par base de données. Dans la littérature, ces méthodes d'apprentissages sont de plus en plus nombreuses et variées, François [François, 2006] les a classées comme suit :

##### ➤ Apprentissage de structures à partir des données complètes

Méthodes basées sur la recherche d'indépendances conditionnelles : ce sont des méthodes basées principalement sur les tests statistiques. Plusieurs algorithmes ont été proposés pour ce type de méthodes, les premiers efficaces sont les algorithmes PC (Sprites et al, 1993), et IC (Peral et Verma, 1991). Ces deux algorithmes ont une sensibilité extrême au bruit et sont inefficaces lorsqu'il y a peu d'exemples. De nouvelles méthodes ont émergé par exemple l'algorithme QFCI (Badea, 2003), BNPC (Cheng et al, 2002)...

Fonctions de scores : cette famille regroupe les méthodes d'apprentissage basées sur les fonctions de score. Cette classe de méthodes a été développée dans le but de remédier à l'inconvénient majeur des méthodes basées sur les tests statistiques. En effet, lorsque le nombre de nœuds du réseau bayésien augmente, le nombre de tests statistiques à effectuer croît exponentiellement. Les méthodes d'identification d'indépendances conditionnelles deviennent donc compliquées à mettre en œuvre. Ces approches vont soit chercher la structure qui maximise un certain score, soit chercher les meilleures structures et combiner leurs résultats. Deux grandes familles de scores peuvent être identifiées : les scores bayésiens et les scores pondérés.

### ➤ **Apprentissage de structures à partir des données incomplètes**

Bien que de plus en plus de bases de données sont disponibles, nombreuse celles qui sont incomplètes. Ces incomplétudes sont dues à des raisons très variées telles qu'un oubli d'un opérateur lors de l'enregistrement d'une mesure particulière ou la défaillance de l'appareil de mesure... Les méthodes d'apprentissages des réseaux bayesiens doivent être alors adaptées à ce type de bases de données pour élargir leurs champs d'application. Plusieurs travaux ont été menés dans cette direction afin d'aboutir à des solutions pour ce genre de problématiques. Plus récemment, une méthode nommée MWST-EM a été proposée par (François et Leray, 2005) [Ben Salem, 2008], cette méthode ne cherche pas à choisir un meilleur graphe dans un voisinage, mais la structure arborescente optimale.

Une présentation plus exhaustive avec des discussions sur les différentes méthodes d'apprentissage de structures est décrite dans les travaux de [Leray et François, 2004] et [François, 2006].

## **II. 2. Apprentissage des paramètres**

La phase d'apprentissage des paramètres consiste à estimer les distributions de probabilités du modèle graphique obtenu. Il est clair que l'apprentissage ne dépend pas seulement des variables, mais aussi de leur agencement. En effet, un nœud parent est caractérisé par des probabilités marginales alors qu'un nœud enfant est caractérisé par des probabilités conditionnelles. Généralement, les distributions de probabilités marginales sont connues d'avance puisqu'elles décrivent le degré de confiance des causes. Par contre, les probabilités conditionnelles  $P(X^i = x_k^i / pa(X^i) = x_l^j) = \theta_{i,j,k,l}$  nécessitent d'être apprises. Dans ce but il existe des méthodes différentes d'apprentissage des paramètres dont le choix dépend de la disponibilité des données [Naim et al, 2007] et [Weissenbacher, 2008] : globalement l'apprentissage se fait à partir d'une base des données ou par avis d'expert.

### **II. 2. 1. Apprentissage d'une base de données**

Le travail ici consiste à estimer les distributions de probabilités (ou les paramètres des lois correspondantes) à partir de données disponibles. L'estimation de distributions de probabilités, paramétriques ou non, est un sujet très vaste et complexe. Nous décrivons ici les méthodes les plus utilisées dans le cadre des réseaux bayesiens, selon que les données disponibles sont complètes ou non.

#### ➤ **À partir de données complètes**

Apprentissage statistique : dans le cas où toutes les variables sont observées, la méthode la plus simple et la plus utilisée est l'estimation statistique qui consiste à estimer la probabilité d'un événement par la fréquence d'apparition de l'événement dans la base de données. Cette approche, appelée maximum de vraisemblance (MV), s'exprime :

$$P(X^i = x_k^i / pa(X^i) = x_l^j) = \theta_{i,j,k,l}^{MV} = \frac{N_{i,j,k,l}}{\sum_k N_{i,j,k,l}} \quad (II. 4)$$

Où  $N_{i,j,k,l}$  est le nombre d'événements dans la base de données pour lesquels la variable  $X^i$  est dans l'état  $x_k^i$  et ses parents sont dans la configuration  $x_l^j$ .

Apprentissage bayésien : l'estimation bayésienne suit un principe quelque peu différent. Il consiste à trouver les paramètres  $\theta$  les plus probables sachant que les données ont été observées, en utilisant des *a priori* sur les paramètres.

- l'approche de maximum *a posteriori* (MAP) :

$$P(X^i = x_k^i / pa(X^i) = x_l^j) = \theta_{i,j,k,l}^{MAP} = \frac{N_{i,j,k,l} + \alpha_{i,j,k,l} - 1}{\sum_k N_{i,j,k,l} + \alpha_{i,j,k,l} - 1} \quad (II. 5)$$

- l'approche d'espérance *a posteriori* (EAP) :

$$P(X^i = x_k^i / pa(X^i) = x_l^j) = \theta_{i,j,k,l}^{EAP} = \frac{N_{i,j,k,l} + \alpha_{i,j,k,l}}{\sum_k (N_{i,j,k,l} + \alpha_{i,j,k,l})} \quad (II. 6)$$

Où  $\alpha_{i,j,k,l}$  sont les paramètres de la distribution de Dirichlet associée à la loi *a priori*  $P(X^i = x_k^i / pa(X^i) = x_l^j)$ .

### ➤ A partir de données incomplètes

Dans les applications pratiques, les bases de données sont très souvent incomplètes. Certaines variables ne sont observées que partiellement ou même jamais, que ce soit en raison d'une panne de capteurs, d'une variable mesurable seulement dans un contexte bien précis, d'une personne sondée ayant oublié de répondre à une question, etc.

Notons  $D = \{X_i^l\}$  notre ensemble de données, avec  $Do$  la partie observée mais incomplète de  $D$ , et  $Dm$  la partie manquante. Notons aussi  $M = \{M_{il}\}$  avec  $M_{il} = 1$  si  $X_i^l$  est manquant, et  $0$  sinon.

Le traitement des données manquantes dépend de leur nature, on distingue plusieurs types de données manquantes :

-MCAR (Missing Completely At Random) :  $P(M/D) = P(M)$ , la probabilité qu'une donnée soit manquante ne dépend pas de  $D$ ,

-MAR (Missing At Random) :  $P(M/D) = P(M/Do)$ , la probabilité qu'une donnée soit manquante dépend des données observées,

-NMAR (Not Missing At Random) : la probabilité qu'une donnée soit manquante dépend à la fois des données observées et manquantes.

Des approches et des algorithmes ont été développés afin de résoudre le problème, plus de détails sont énumérés dans [Leray, 2006] et [Naim et al, 2007].

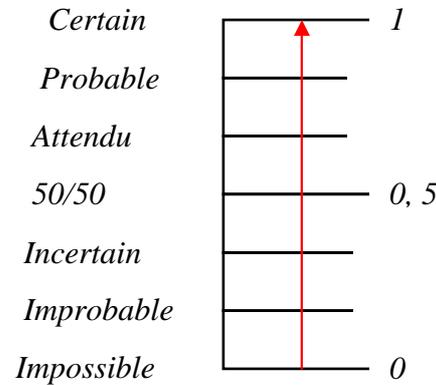
## II. 2. 2. Avis d'expert

Dans de nombreuses applications réelles, il n'existe pas (ou très peu) de données. Dans ces situations, l'apprentissage des paramètres du réseau bayésien passe par l'utilisation de connaissances d'experts pour tenter d'estimer les probabilités conditionnelles. Cette difficulté, souvent appelée élicitation de probabilités dans la littérature, est générale dans le domaine de l'acquisition de connaissances, l'utilisation d'une échelle de probabilité permettant à l'expert d'estimer de manière quantitative ou qualitative la probabilité d'un événement quelconque. Malheureusement, chaque paramètre d'un réseau bayésien est une loi de probabilité conditionnelle dont la taille augmente exponentiellement par rapport au nombre de parents de la variable considérée. Il n'est donc pas réaliste d'interroger un expert sur toutes les valeurs de chacune de ces lois. Cependant, il existe quelques méthodes permettant de simplifier une loi de probabilité conditionnelle, ce qui diminue le nombre de questions à poser à l'expert.

➤ **Echelle de probabilité**

Celle-ci permet aux experts d'utiliser des informations à la fois textuelles et numériques pour assigner un degré de réalisation à telle ou telle affirmation, puis éventuellement de comparer les probabilités pour les modifier.

Tabl. II. 3. Echelle de probabilité.



Supposons maintenant que l'expert doit estimer la probabilité conditionnelle  $P(Y / X^1, X^2, \dots, \bar{X}^i, \dots, X^n)$  et que toutes les variables ( $Y$  et  $X^i$ ) soient binaires. L'expert devra donc estimer  $2^n$  valeurs, ce qui est peu réaliste pour des problèmes complexes.

➤ **Modèle OU bruité**

Le modèle OU bruité, proposé initialement par Pearl, pose les hypothèses suivantes :

- on peut calculer facilement la probabilité que  $X^i$  cause  $Y$  alors que les autres variables  $X^j$  sont absentes.
- le fait que  $X^i$  cause  $Y$  est indépendant des autres variables  $X^j$  (pas d'effet mutuel entre les variables).

Le modèle *OU bruité* révèle alors que : si un des  $X^i$  est vrai, alors  $Y$  est presque toujours vrai. Et si plusieurs  $X^i$  sont vrais, alors la probabilité que  $Y$  soit vrai est :

$$P(y / X) = 1 - \prod_{i / X^i \in \mathcal{X}^p} (1 - p_i) \quad (II. 7)$$

Où  $\mathcal{X}^p$  est l'ensemble des  $X^i$  vrais.

Il est important de noter que cette modélisation simplifiée des probabilités conditionnelle a donné de bons résultats dans les domaines tels le diagnostic médical ou le diagnostic des défaillances.

➤ **Facteur interpolation**

L'utilisation des facteurs d'interpolation a été proposée pour la détermination pratique de tables de probabilités conditionnelles. A la différence du modèle précédent, l'expert est consulté pour déterminer la probabilité des événements suivants :

$$\begin{aligned} \bar{p}_i &= P(y / X^1, X^2, \dots, \bar{X}^i, \dots, X^n) \\ \bar{p} &= P(y / \bar{X}^1, \bar{X}^2, \dots, \bar{X}^i, \dots, \bar{X}^n) \\ p &= P(y / X^1, X^2, \dots, X^i, \dots, X^n) \end{aligned} \quad (II. 8)$$

Ces valeurs permettent de calculer les facteurs d'interpolation  $IF_i$  de la façon suivante :

$$IF_i = \frac{\bar{p}^i - \bar{p}}{p - \bar{p}} \quad (II. 9)$$

Chacun de ces facteurs peut être interprété comme l'effet relatif (par rapport à  $\bar{p}^i$ , situation où tous les  $X^i$  sont "absents") du passage de  $X^i$  de  $\bar{x}^i$  à  $x_i$  (lorsque tous les autres  $X^j$  sont à  $x_j$ ). Dans le cas le plus simple proposé par Cain [Cain, 2004], parents non modifiants, l'effet de chaque  $X_i$  sur  $Y$  ne dépend pas de la valeur des autres  $X^j$ . Avec cette hypothèse, le facteur d'interpolation est donc de manière plus générale l'effet de la variation de  $X^i$  quelles que soient les valeurs prises par les autres  $X^j$ , ce qui permet de calculer par récurrence la valeur de n'importe quelle probabilité  $P(y / X)$ , par exemple :

$$P(y / X^1, X^2, \dots, \bar{X}^i, \dots, \bar{X}^j, \dots, X^n) = \bar{p}^i + IF_i(\bar{p}^j - \bar{p}) \quad (II. 10)$$

L'approche se généralise aussi au cas où certains parents sont modifiants en estimant des facteurs d'interpolation spécifiques à chaque configuration de ces parents modifiants.

### II. 3. Inférence dans un réseau bayésien

L'inférence dans un réseau bayésien se résume à un calcul de probabilités *a posteriori*. Connaissant les états de certaines variables (appelées *variables d'observation*), on détermine les probabilités des états de certaines autres variables (appelées *variables cibles*) conditionnellement aux observations. Il existe plusieurs algorithmes d'inférence dans les réseaux bayésiens classés en deux groupes [Infante, 2006], [Bouzaine-Marle, 2005] et [Murphy, 2002]. D'un côté nous avons les méthodes d'inférence exactes qui exploitent les indépendances conditionnelles contenues dans les réseaux et donnent à chaque inférence les probabilités *a posteriori* exactes. Parmi ces méthodes citons la méthode "Messages locaux", "Ensemble de coupes", "Arbre de jonction", "Inversion d'arcs" et "Elimination de variables", [Serrou et Leray, 2006].

De l'autre côté nous avons les méthodes approchées qui estiment les probabilités *a posteriori*. Pour ces méthodes, deux exécutions d'une inférence peuvent donner des probabilités *a posteriori* différentes. Parmi les méthodes d'inférence approchées existent les méthodes basées sur la "simulation stochastique par Chaîne de Monte-Carlo", "Loopy belief propagation", "les méthodes variationnelles", "les méthodes de recherche de masse", d'autres sont basées sur "la simplification du réseau" [Serrou et Leray, 2006].

L'efficacité de l'inférence dans les réseaux bayésiens dépend de plusieurs éléments : l'algorithme choisi et ses paramètres (en particulier le nombre d'échantillons), le réseau bayésien et ses caractéristiques (taille du réseau, «densité» du réseau, taille des domaines de définition des variables, etc.), et le calcul d'inférence à exécuter et ses caractéristiques (en particulier le nombre et la position des variables observation et cibles).

### III. Extension des réseaux bayésien

Il existe plusieurs déclinaisons des réseaux bayésiens et le choix de modèle se fait selon les modes de dépendances entre les variables (causales, hiérarchiques, temporelles) la disponibilité des informations (raison de confidentialité),... etc. Dans ce qui suit est présentée l'utilité des différentes extensions et par la suite trois de ces modèles seront décrits.

Les réseaux bayésiens multi-agents : sont utiles lorsque les informations ne sont disponibles que localement, et que pour diverses raisons (de confidentialité par exemple), les différents agents ne veulent pas partager leurs informations. Dans ce cas, il leur sera tout de même

possible d'utiliser leurs informations respectives sans pour autant les divulguer. Le résultat d'une inférence dans ce réseau particulier satisfera alors les différents partis.

Les réseaux bayesiens de niveau deux : sont utiles pour avoir une visualisation plus concise et donc plus lisible des relations de dépendance entre les attributs.

Les réseaux bayesiens orientés objets (voire ci-dessous) : sont utiles lorsqu'une sous structure est répétée à plusieurs endroits du réseau global, cela permet d'avoir une représentation plus économique et plus lisible, en particulier si le réseau global est constitué d'une répétition d'une sous structure particulière. Par exemple, cette représentation peut être utile pour les réseaux bayesiens dynamiques.

Les diagrammes d'influence (voire ci-dessous) : sont une extension des réseaux bayesiens qui introduit des nœuds de nouvelle nature liés à la problématique de l'aide à la décision.

Les réseaux bayesiens dynamiques (voire ci-dessous) : sont utiles pour modéliser des phénomènes dynamiques ou temporels, en utilisant un temps discret.

Les réseaux bayesiens continus : sont utiles pour modéliser des phénomènes temporels lorsque le temps est continu.

Les filtres bayesiens : sont des réseaux bayesiens dynamiques particuliers, ils ne possèdent qu'une variable d'état et une variable d'observation. Leurs variantes appelées les filtres de Kalman ont été très utilisées pour des problématiques où le nombre d'états n'était pas discret.

Les processus de décision markoviens : sont une extension des modèles dynamiques et des diagrammes d'influence, ils permettent de traiter des problèmes liés à la décision tout en prenant en compte un aspect temporel.

Les réseaux bayesiens causaux, également appelés les *modèles markoviens* : sont utiles si l'on veut s'assurer que toutes les dépendances codées ont une signification réelle. Ils ne doivent donc pas être utilisés comme de simples outils de calcul comme il serait possible de le faire avec un réseau bayésien classique, il faut alors s'appuyer sur leur pouvoir expressif.

Les réseaux bayesiens multi-entités : sont une extension des réseaux bayesiens et de la logique bayésienne du premier ordre qui permet d'utiliser plusieurs 'petits' réseaux bayesiens pour modéliser un système complexe. Ils contiennent des variables contextuelles, qui peuvent être de différentes natures, notamment liées à des notions de décision.

### III. 1. Les diagrammes d'influence

Les réseaux bayesiens constituent des outils efficaces pour effectuer des tâches d'aide à la décision dans le sens où ils permettent d'évaluer différentes probabilités en fonction de l'état connu du système. Cependant, ils ne permettent pas de modéliser naturellement un système sur lequel l'opérateur peut agir. Il est alors possible d'étendre leur formalisme en introduisant de nouveaux types de nœuds : les nœuds utilité et les nœuds décision. En effet, les décideurs souhaitent souvent associer une utilité à chaque décision possible. Cette utilité représente la qualité ou encore le coût lié à ces décisions. Ces modèles, appelés les diagrammes d'influence, ont initialement été introduits comme étant une représentation compacte des graphes de décision. Ils sont à présent plutôt vus comme des extensions des réseaux bayesiens.

*Définition* : Un diagramme d'influence est constitué d'un graphe orienté sans circuit contenant des nœuds probabilistes, des nœuds d'utilité et des nœuds de décision vérifiant les conditions structurelles suivantes :

- il existe un chemin passant par tous les nœuds décision,
- les nœuds utilité n'ont pas d'enfants.

Sont demandées de plus les conditions paramétriques suivantes :

- les nœuds décision et les nœuds probabilistes ont un nombre fini d'états mutuellement exclusifs,
- les nœuds d'utilité n'ont pas d'état, il leur est attaché une fonction réelle définie sur l'ensemble des configurations de leurs parents.

Habituellement, pour différencier les différents types de nœuds, les nœuds probabilistes sont représentés par des cercles, les nœuds décision par des carrés et les nœuds utilité par des losanges comme sur l'exemple suivant.

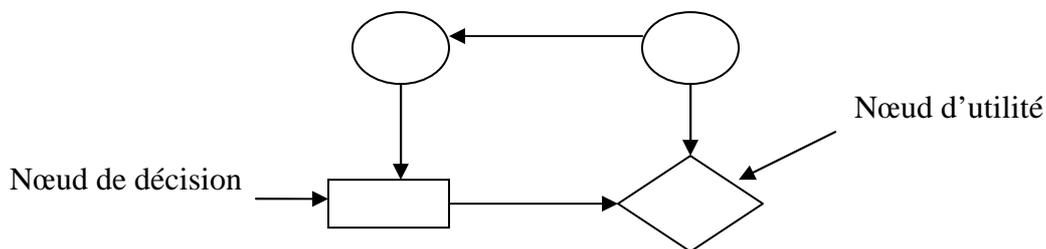


Fig. II. 2. Exemple: diagramme d'influence.

### III. 2. Les réseaux bayésiens orientés objets

Lorsque, dans un réseau bayésien, une sous-structure (avec ses paramètres) apparaît de manière répétée, il est possible de représenter ce dernier à l'aide d'un réseau bayésien dit orienté objet. Ces modèles sont particulièrement bien adaptés pour représenter les réseaux bayésiens dynamiques ou encore les réseaux bayésiens multi-agents. Ils permettent également de modéliser des systèmes complexes pour lesquels le même mode de raisonnement apparaît dans différents sous-systèmes.

Pour ce type de réseau, les nœuds d'entrée des sous-structures sont représentés en pointillé, alors que les nœuds de sortie sont représentés en gras. Les autres nœuds de la sous-structure n'appartenant qu'à celle-ci, sont donc représentés classiquement lorsque l'on étudie la sous-structure. Cependant, les nœuds classiques de la sous-structure sont cachés lorsque l'on représente le réseau bayésien général.

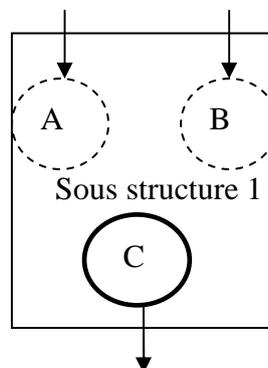


Fig. II. 3. RBOO générique représentant les nœuds d'entrée et de sortie.

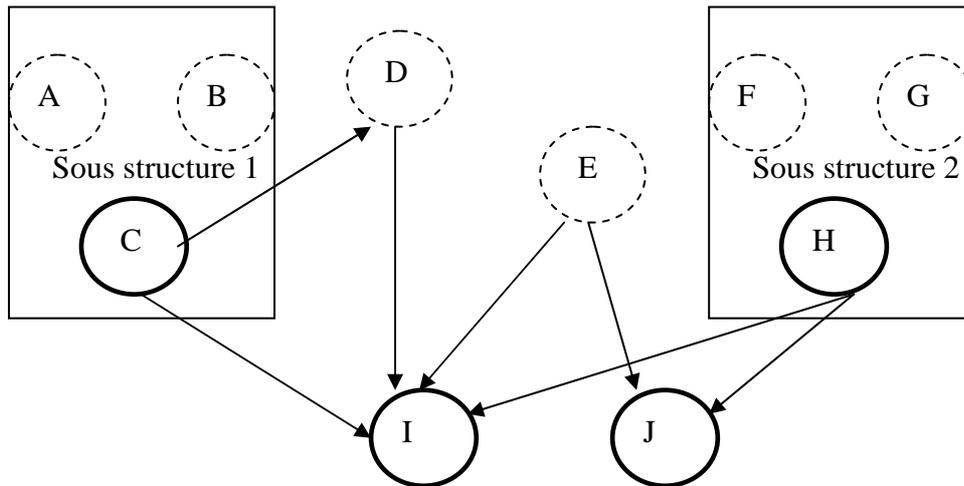


Fig. II. 4. Exemple RBOO exploitant la sous structure 1.

### III. 3. Les réseaux bayésien dynamique

Les réseaux bayésiens dynamiques (*RBD*), sont une extension des *RB* modélisant des processus stochastiques variant dans le temps. En plus des nœuds statistiques introduits par les *RB* classiques, les *RBD* introduisent un nouveau type de nœuds dits temporels pour modéliser des variables aléatoires discrètes dépendant du temps. La structure graphique dans un *RBD* fournit une manière simple de détailler ces indépendances conditionnelles, et fournit ainsi une paramétrisation réduite du modèle. Leray [Leray, 2006] suggère d'appeler les *RBD* par «réseaux dynamique temporel » à partir du moment où il est supposé que la structure du modèle ne change pas. Dans un *RBD*, deux types d'arcs peuvent être considérés : les arcs synchroniques et les arcs diachroniques.

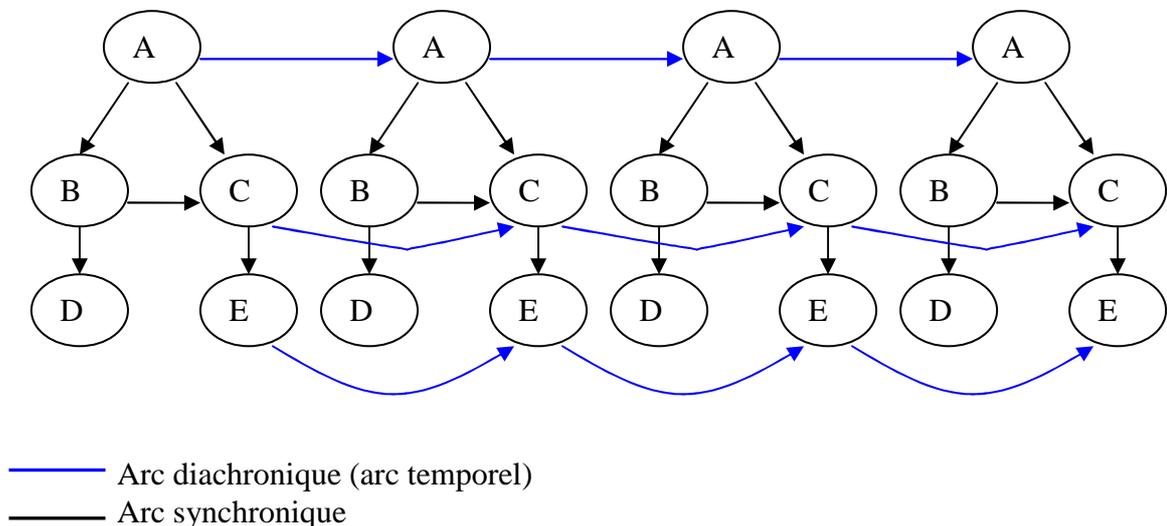


Fig. II. 5. Réseau bayésien dynamique déroulé sur 4 pas de temps.

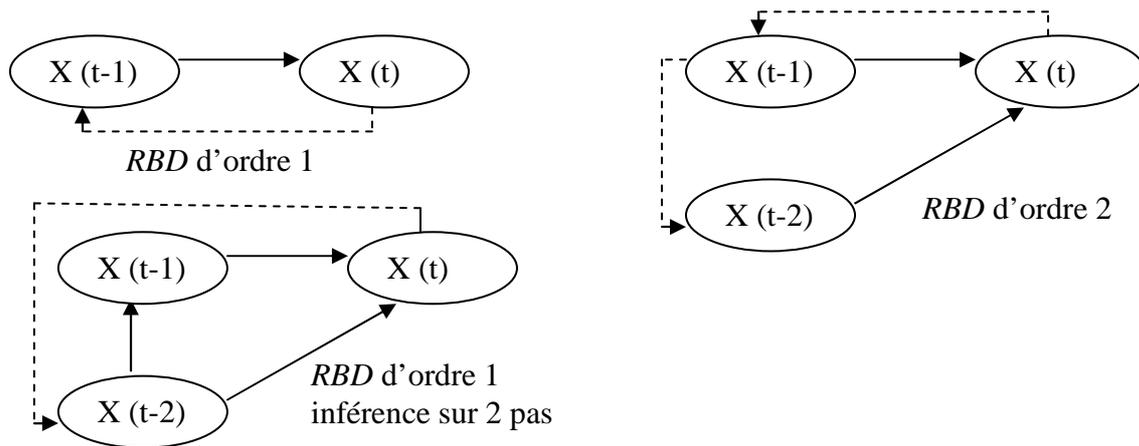


Fig. II. 6. Exemple de RBD (ordre et inférence).

## VI. Application des réseaux bayésiens dans la sûreté de fonctionnement et la maintenance

L'étude bibliographique entreprise pour dresser l'état de l'art a mis en évidence un nombre important de publications scientifiques, depuis la fin des années 1990 et en forte croissance ces dernières années, proposant des approches à base de réseaux bayésiens pour l'analyse des risques, la sûreté de fonctionnement des systèmes, le diagnostic ou la maintenance.

Corset [Corset, 2003] et Celeux et al [Celeux et al, 2006] dans leurs travaux ont abordé la construction pratique d'un réseau bayésien dans le contexte d'une étude de sûreté de fonctionnement. Verron dans sa thèse [Verron, 2007] a étudié les différentes approches proposées dans la littérature dans le contexte de diagnostic et il a fait un classement selon trois catégories, à savoir : défauts de capteurs, exploitation de données de fautes, exploitation des données de fonctionnement normal.

Medina Oliva et al [Medina Oliva et al, 2009] et Weber et al [Weber et al, 2010] ont à leur tour produit un état de l'art sur les réseaux bayésiens dans les études de sûreté de fonctionnement, de maintenance et de l'analyse de risque, ainsi ils ont présenté l'évolution d'un grand nombre de thèmes de recherches traités dans ces domaines. Le travail fourni dans cette thèse se limitera à la présentation de l'évolution des thèmes de recherches dans le domaine de la sûreté et de maintenance avec quelques références pertinentes.

### Pour la sûreté de fonctionnement

Les premières contributions majeures ont été effectuées par Castillo [Castillo et al, 1997], Sucar et Torres-Toledano [Sucar et Torres-Toledano, 1998], Arroyo [Arroyo et al, 1998] et Kang et Golay [Kang et Golay, 1999], leurs objectifs étaient : l'estimation de la fiabilité d'un système avec possibilité de défaillance dépendante et la modélisation des systèmes complexes. En plus, les projets BOLARR [Welch et Thelen, 2000] et SERENE [Bouissau et al, 1999], le premier a mis l'accent sur la modélisation dynamique de l'analyse des risques par les réseaux bayésiens tandis que SERENE vise à formaliser le raisonnement des experts afin d'évaluer les différents aspects de la fiabilité des systèmes critiques.

Après cette première étape axée sur les réseaux bayésiens statiques, les travaux se sont portés sur les modèles dynamiques [Weber et Jouffe, 2006] et [Montani et al, 2006], des études plus récentes encore ont porté sur l'estimation de la fiabilité en prenant l'aspect temporel par l'utilisation des réseaux bayésiens dynamiques (RBD), toujours pour l'étude de sûreté, Neil et al [Neil et al, 2008] ont construit des RB hybrides (nœuds discrets et continus),

l'algorithme utilisé combine l'échantillonnage dynamique avec les algorithmes de propagation classique. Les auteurs présentent ce concept comme une méthode alternative aux méthodes de simulation telle que Monte Carlo par chaînes de Markov (*MCMC*).

Langseth et al [Langseth et al, 2009] proposent une synthèse sur les inférences dans *RB* hybrides dans le cadre de l'analyse de fiabilité, ils explorent quatre approches qui sont : Mélanges des exponentielles tronquées (*MTE*), les méthodes variationnelles, chaînes de Markov Monte Carlo (*MCMC*) et de discrétisation. L'approche la mieux adaptée pour obtenir des approximations des événements de faible probabilité à des fins d'approximations semble être la *MTE*, car elle concilie la nécessité d'une bonne approximation dans la fin de la distribution avec la complexité des calculs pas trop élevée.

Certaines applications existent dans ce domaine : par exemple l'estimation de la fiabilité dans les processus industriels, l'industrie des pâtes et papiers [Pourret et al, 2008], le diagnostic des défauts des composants et la validation du capteur à la NASA [Mengshoel et al 2008].

### Pour la Maintenance

Les travaux sur l'utilisation des réseaux bayesiens dans la maintenance sont relativement récents, ainsi Kang et Golay [Kang et Golay, 1999] ont proposé un model avec des diagrammes d'influence qui considèrent les évidences; le but est d'estimer l'état futur d'un système après une action particulière, la proposition d'une action est faite sur la base des probabilités conditionnelles et les valeurs d'utilité.

Weber et Jouffe [Weber et Jouffe, 2006], Iung et al [Iung et al, 2005] et Borgia et al [Borgia et al, 2009] se sont intéressés à l'utilisation de *RBD* pour la modélisation des relations de cause à effet entre la dégradation / cause / conséquence. Celeux et al [Celeux et al, 2006] proposent une procédure afin de solliciter les experts, cette procédure est mise en place dans le but de recueillir l'information et de construire la structure du réseau. Récemment Muller et al [Muller et al, 2008] ont proposé un model de pronostic pour l'évaluation de la maintenance, ainsi que Donat [Donat, 2009] a proposé l'approche MBF dynamique et générique et son application à la prévention des ruptures de rails.

## **Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'introduire plus en détail les réseaux bayesiens, nous avons vu qu'il est possible d'apprendre les paramètres d'un réseau bayésien (structure graphique du modèle et lois de probabilité) à partir de données complètes ou incomplètes, ou encore à partir d'avis d'experts. De plus on a présenté ce qu'est l'inférence et les différentes extensions de ces réseaux.

Nous avons procédé en revue dans la littérature, les applications et le développement des réseaux bayesiens dans le contexte de la sûreté et de la maintenance.

CHAPITRE

# III

**Approche analytique**

---

Dans ce chapitre il est proposé de présenter la méthodologie adoptée pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement d'un système à l'aide d'un réseau bayésien dynamique et de faire la description de l'équipement industriel choisit. Un des objectifs envisagés dans ces travaux est la conception d'une démarche analytique, assez fiable pour apporter des renseignements significatifs sur le comportement d'un système industriel. La concrétisation de cette caractérisation du système se fera à travers un modèle comportemental dynamique d'un processus stochastique et répondre à la problématique qui consiste à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement, par l'utilisation de formalisme des réseaux bayésiens.

## I. Présentation générale de l'approche

Dans le chapitre I, il a été spécifié qu'une des caractéristiques importantes de l'ensemble des systèmes industriels est leur comportement physique variable en fonction du temps, en raison des interactions entre les composants de ces systèmes ou avec l'environnement. De plus, il a été également mis en évidence l'importance et l'impact de la stratégie de maintenance sur les performances de ces systèmes.

Il est à noter aussi que le formalisme des *RB* introduit dans le chapitre II (§, I), ne permet pas de présenter les systèmes évoluant au cours de temps (i.e. qui contiennent des variables dont la table de probabilités conditionnelle *TPC* à l'instant présent dépend des informations passées) [Bouillaut et al, 2008]. Ce type de problématique conduit à l'utilisation de l'extension dynamique des *RB* présentée dans le chapitre II (§, III. 2).

### I. 1. Etapes de la méthodologie

Afin d'aboutir à l'objectif fixé, c'est-à-dire concevoir des modèles permettant, pour de diverses stratégies de maintenance, d'évaluer les paramètres de sûreté de fonctionnement. A cet effet, l'approche utilisée est basée sur les travaux de Ben Salem [Ben Salem, 2008] et Muller et al [Muller et al, 2008], elle comprend :

#### 1) Elaboration d'un modèle représentant le processus de dégradation du système

Le but de cette étape est de fournir un cadre de modélisation simple à base des réseaux bayésiens dynamiques pour suivre la dégradation d'un système à plusieurs composants d'une manière factorisée. Cette étape s'effectue en deux temps [Ben Salem, 2008] :

- Modéliser la dégradation des différents composants, considérés individuellement, du système,
- Ensuite, à partir de ces modèles, établir un modèle global de dégradation en tenant compte des dépendances fonctionnelles entre les composants.

#### 2) Elaboration d'un modèle représentant les diverses stratégies de maintenance envisageables et leur impact sur la dégradation de composant.

Le but de cette étape est d'intégrer la stratégie de maintenance sur le modèle de dégradation. Cette dernière correspond à une influence volontaire portée sur le système pour le faire transiter d'un état à un autre. D'une autre façon, la stratégie de maintenance consiste à associer une action de maintenance pour chaque état du système dans le but de modifier sa trajectoire.

### I. 2. Présentation de l'approche

Dans cette partie sont détaillées les différentes étapes de la méthodologie.

#### I. 2. 1. Modélisation de la dégradation d'un système

Comme cela est indiqué dans le chapitre II, un *RB* est complètement déterminé par sa *topologie* et ses *paramètres*, à savoir la distribution de la probabilité marginale *des nœuds*

racines et les probabilités conditionnelles des *nœuds enfants*. Ainsi la *topologie* décrivant la dégradation d'un composant est représentée dans la Fig III. 1. [lung et al, 2005], [Weber et Jouffe, 2006], [Ben Salem, 2008], [Bouillaut et al, 2008], [François et al, 2008] et [Donat, 2009].

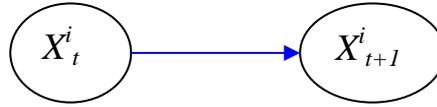


Fig. III. 1. Topologie décrivant la dégradation d'un composant.

La suite  $(X_t)_{1 \leq t \leq T}$ , représente l'état du système sur une séquence de longueur  $T$ .

La structure graphique étant déjà définie, il est ensuite nécessaire de définir la table de probabilités conditionnelle (TPC) attribuant la probabilité de voir le système passé de l'état  $X_t$  à l'état  $X_{t+1}$ . Donc, la détermination des probabilités conditionnelles  $P(X_{t+1}^i / X_t^i)$  est indispensable à ce niveau.

Dans cette phase, deux familles de composants sont à distinguer : les composants à taux de défaillance constant, et ceux à taux de défaillance variable.

- *Composants à taux de défaillance constant* : l'ensemble des valeurs de la variable est val  $\{X^i\} = \{marche(O), défaillant(F)\}$ , dans ce cas il faut déterminer uniquement les probabilités conditionnelles  $P(X_{t+1}^i = O / X_t^i = F)$  et  $P(X_{t+1}^i = F / X_t^i = O)$ .

$P(X_{t+1}^i = O / X_t^i = F)$  désigne la probabilité que le système passe naturellement de l'état de défaillance vers l'état de marche pour les systèmes non autoréparables. Elle est alors égale à zéro.

$P(X_{t+1}^i = F / X_t^i = O)$  désigne la probabilité que l'état du système se dégrade dans le temps  $\Delta t$  séparant les instants de décision  $t$  et  $t + 1$ . C'est-à-dire,

$$P(X_{t+1}^i = F / X_t^i = O) = P(t \leq T \leq t + \Delta t | T > t) \quad (III. 1)$$

Où :

$T$  une variable aléatoire absolument continue et strictement positive représentant la durée avant l'apparition d'une défaillance. Afin de déterminer la valeur de  $P(t \leq T \leq t + \Delta t | T > t)$ , il faut se baser sur la définition de la défaillance.

$$\lambda = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} \quad (III. 2)$$

Ainsi, si  $\lambda \Delta t$  est petit, cette équation devient,  $\lambda \Delta t \approx P(t \leq T \leq t + \Delta t | T > t)$ .

En utilisant l'équation (III. 1), la probabilité conditionnelle  $P(X_{t+1}^i = F / X_t^i = O)$  est donnée par,

$$P(X_{t+1}^i = F / X_t^i = O) \approx \lambda \Delta t \quad (III. 3)$$

Le terme  $\lambda \Delta t$  peut être alors interprété comme la probabilité que le système soit défaillant dans l'intervalle  $[t, t + 1]$ . Finalement, et pour simplifier l'estimation de la variable, la TPC du nœud est écrite comme suit :

Tabl. III. 1. Table de Probabilités conditionnelles (TPC).

	$P(X_{t+1}^i / X_t^i)$	
$X_t^i$	O	F
O	$1-\lambda\Delta t$	$\lambda\Delta t$
F	0	1

➤ *Composants à taux de défaillance variable au cours de temps* : la structure du réseau bayésien dynamique précédente est maintenue, par contre, ses paramètres sont distincts. En effet, il comporte deux nœuds  $X_t^i$  et  $X_{t+1}^i$  représentant une variable aléatoire sur deux pas de temps successifs dont l'ensemble des valeurs est,  $val\{X^i\} = \{0, D_1, \dots, D_{N_d}, F\}$ .  
Où :

$D_j, j \in [1, N_d]$  sont un ensemble d'états en série, géométriquement distribuée,  $N_d$  est leur nombre, La TPC du nœud  $X_{t+1}^i$  a donc la forme suivante.

$$M = \begin{pmatrix} \lambda_{00} & \lambda_{01} & \dots & & 0 & \lambda_{0F} \\ 0 & \lambda_{11} & \lambda_{12} & 0 & 0 & \lambda_{1F} \\ \vdots & 0 & \ddots & \ddots & & \\ 0 & \dots & & & \lambda_{N_d N_d} & \lambda_{N_d F} \\ 0 & \dots & & & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Il est à noter néanmoins que dans certaines situations (par exemple, peu ou pas de données) il est utile de travailler à partir d'une loi de durée définie analytiquement. La plupart des lois classiquement utilisées (ex : loi exponentielle, loi de Weibull, loi de Pareto . . .) sont définies sur un support continu et infini (en général  $R^+$ ) du fait de l'homogénéité fréquente de la grandeur représentée à un temps. Le problème lié à la continuité peut se résoudre en effectuant une discrétisation de la loi continue considérée ou en choisissant une loi de durée en temps discret.

**I. 2. 2. Modélisation des dépendances fonctionnelles entre les composants**

La dépendance fonctionnelle décrit la variation de la vitesse de dégradation d'un composant en fonction des états de ses voisins. Cette notion est très importante puisqu'elle est souvent rencontrée sur des cas réels.

Pour modéliser les dépendances de Composant  $C_i$  et Composant  $C_j$ , il suffit de relier les nœuds  $X_t^j$  à  $X_{t+1}^i$  (Fig. III. 2). La TPC de  $X_{t+1}^i$  est alors dupliquée et sa taille augmente avec le nombre de dépendances.

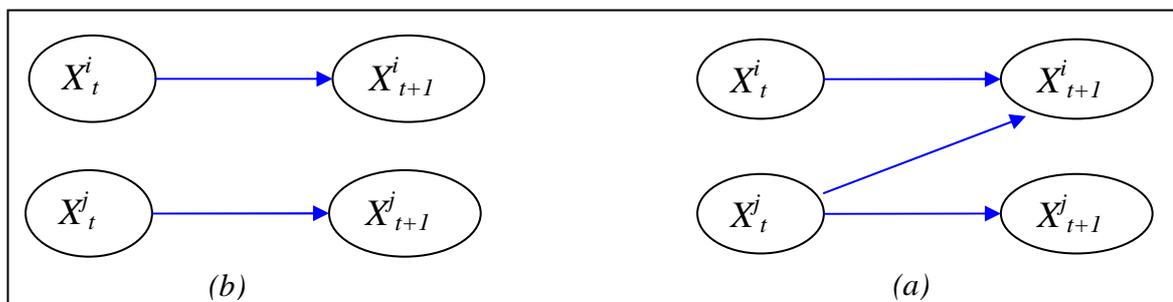


Fig. III. 2. Exemple d'un modèle de dégradation d'un système formé par 2 composants.

(a) composants fonctionnellement indépendants.

(b) composants fonctionnellement dépendants.

Tabl. III. 2. Table de Probabilités conditionnelles (TPC) du nœud  $X_{t+1}^i$ .

		$P(X_{t+1}^i / X_t^j, X_t^i)$	
$X_t^j$	$X_t^i$	O	F
O	O	$1 - \lambda^i \Delta t$	$\lambda^i \Delta t$
	F	0	1
F	O	$1 - \lambda_2^i \Delta t$	$\lambda_2^i \Delta t$
	F	0	1

**I. 2. 3. Modélisation des stratégies de maintenance**

Les stratégies de maintenance correspondent à des influences volontaires portées sur le système. L'exécution d'une maintenance sert à modifier la trajectoire intrinsèque de l'état du système. Le modèle associé à une stratégie donnée, décrit l'impact de cette dernière sur l'évolution de l'état du composant (chapitre I, (§, I)). Les éléments de stratégie pris en compte dans ces travaux touchent uniquement la réalisation des tâches, et plus particulièrement à leurs effets sur le fonctionnement de chaque composant du système.

Pour modéliser ce type de perturbation [Inug, 2005], [Ben Salem, 2008], [Bouillaut et al ,2008], [Muller et al, 2008] proposent la topologie suivante (Fig. III. 3).

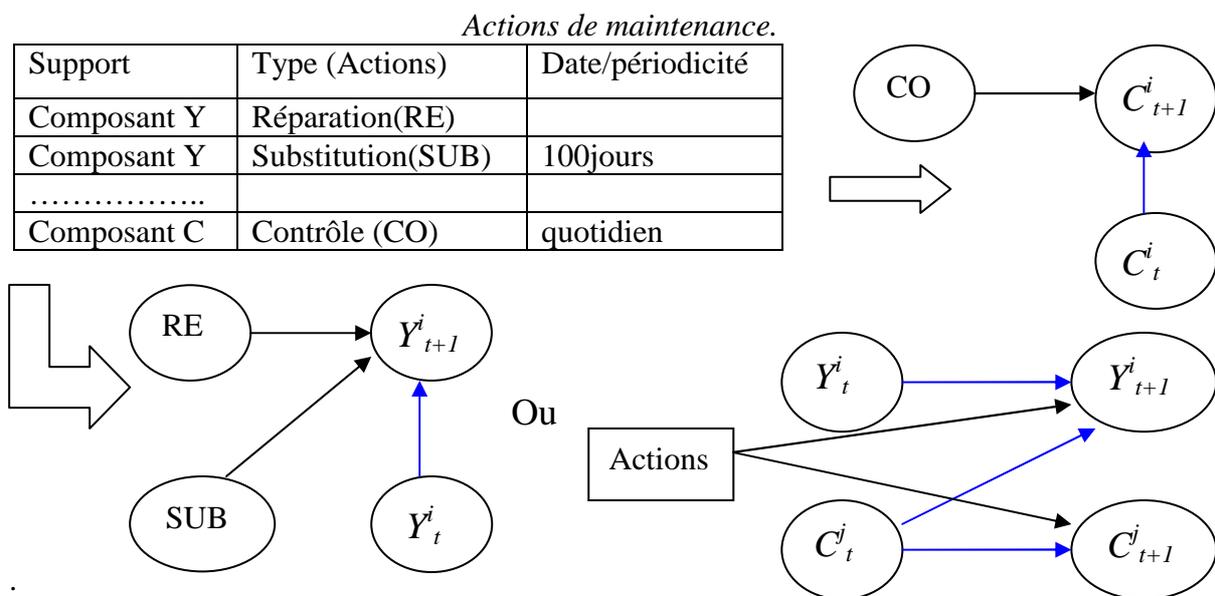
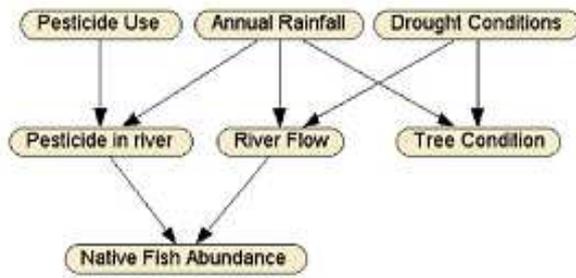


Fig. III. 3. Intégration des actions de maintenance (stratégie).

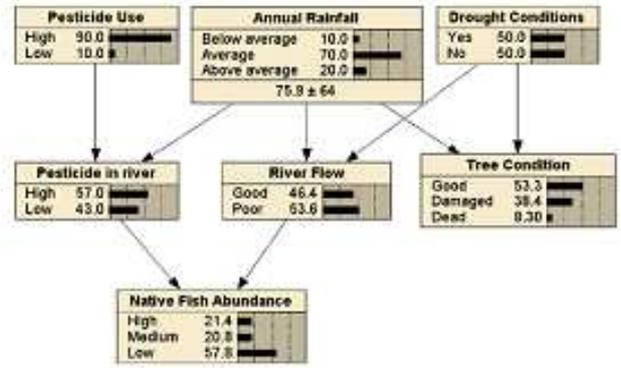
**I. 3. Exploitation du modèle**

Les réseaux bayésiens peuvent être utilisés aussi bien pour le diagnostic que pour les études prospectives [Bouzaine-Marle, 2005] du fait que la formule de Bayes permet de calculer la probabilité d'un état sachant ses causes, mais aussi d'une cause sachant l'événement qui s'est produit. Cette caractéristique est très utile car elle permet d'avoir un réseau générique et de préciser les valeurs de n'importe quelle variable, selon les informations disponibles, et d'en tirer toute la connaissance associée sur les autres variables.

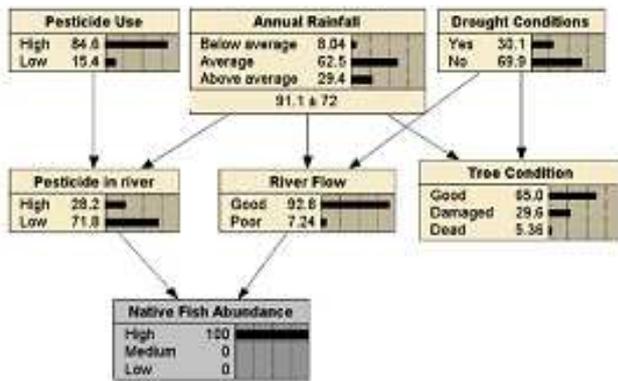
Nicholsona et Floresb [Nicholsona et Floresb, 2011] ont présenté un exemple (Fig. III. 4) d'une structure d'un réseau bayésien et ensuite les différentes façons de l'exploiter telle que son utilisation pour la prédiction, le diagnostic, le raisonnement mixte ou encore sans évidence



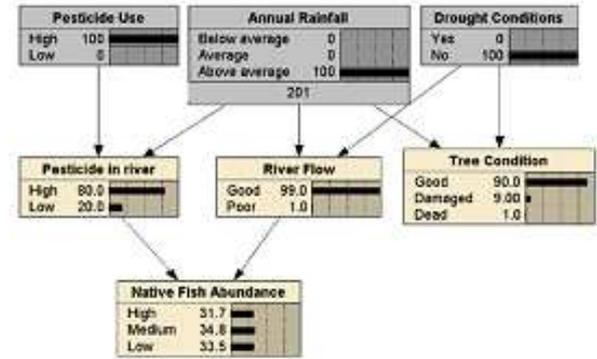
Structure



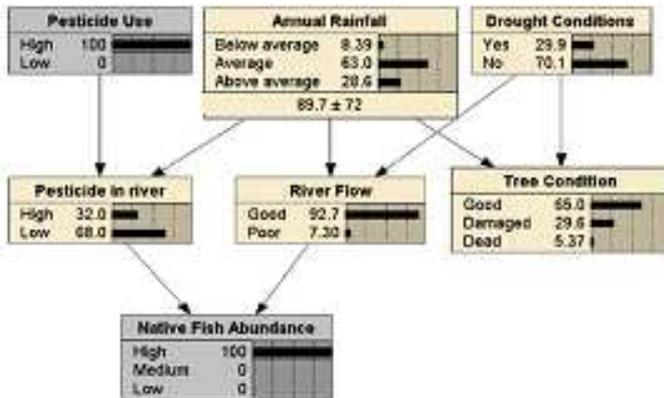
Sans évidence



Diagnostic



Prédiction

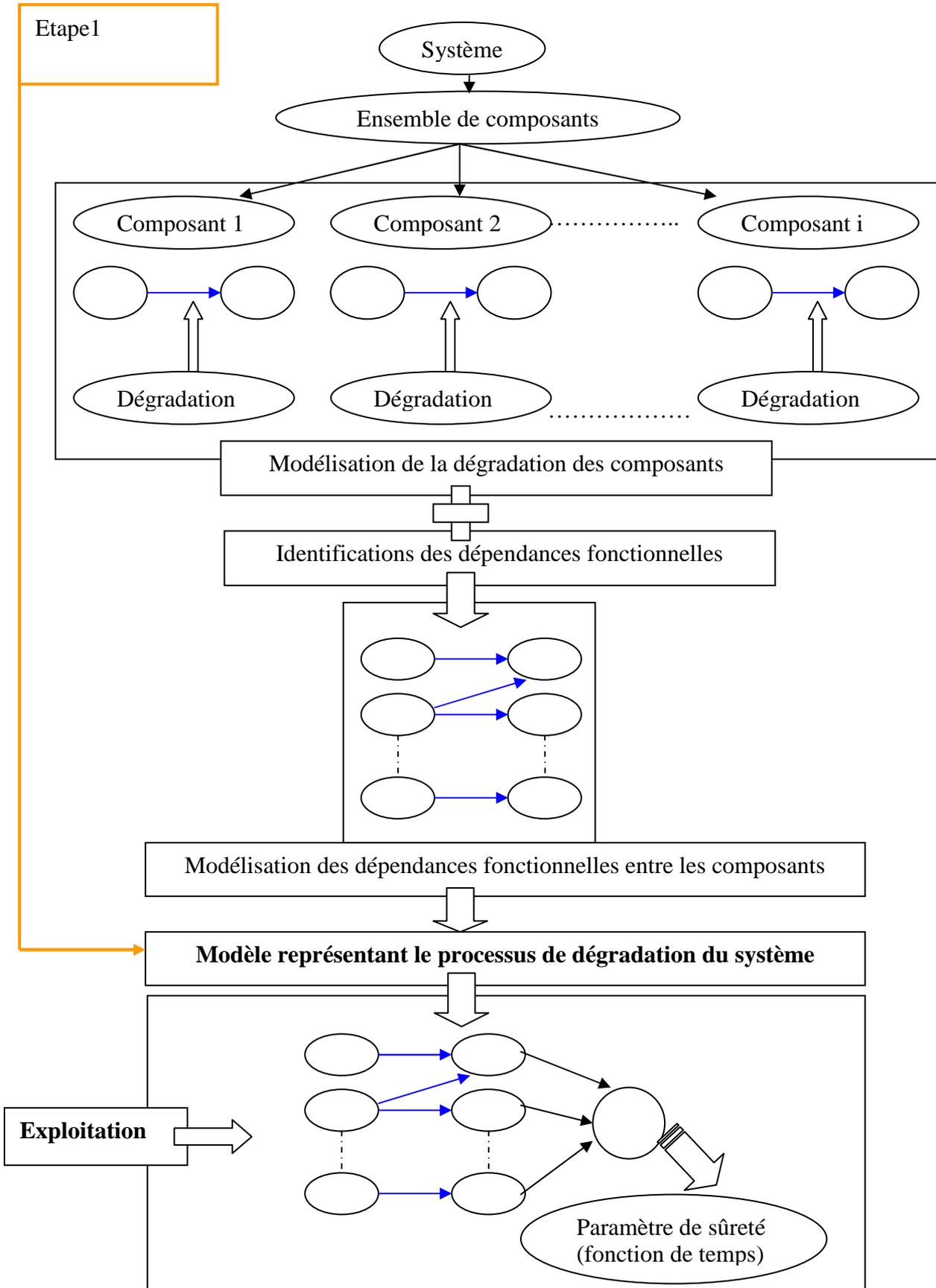


Raisonnement mixte

Fig. III. 4. Exemple "Native Fish" présentant les différentes façons d'exploiter un réseau (Nicholson and Woodberry, 2010) [Nicholson et Floresb, 2011].

**I. 4. Modélisation du système**

La figure suivante résume les étapes de la modélisation choisie permettant l'évaluation des performances d'un système maintenu.



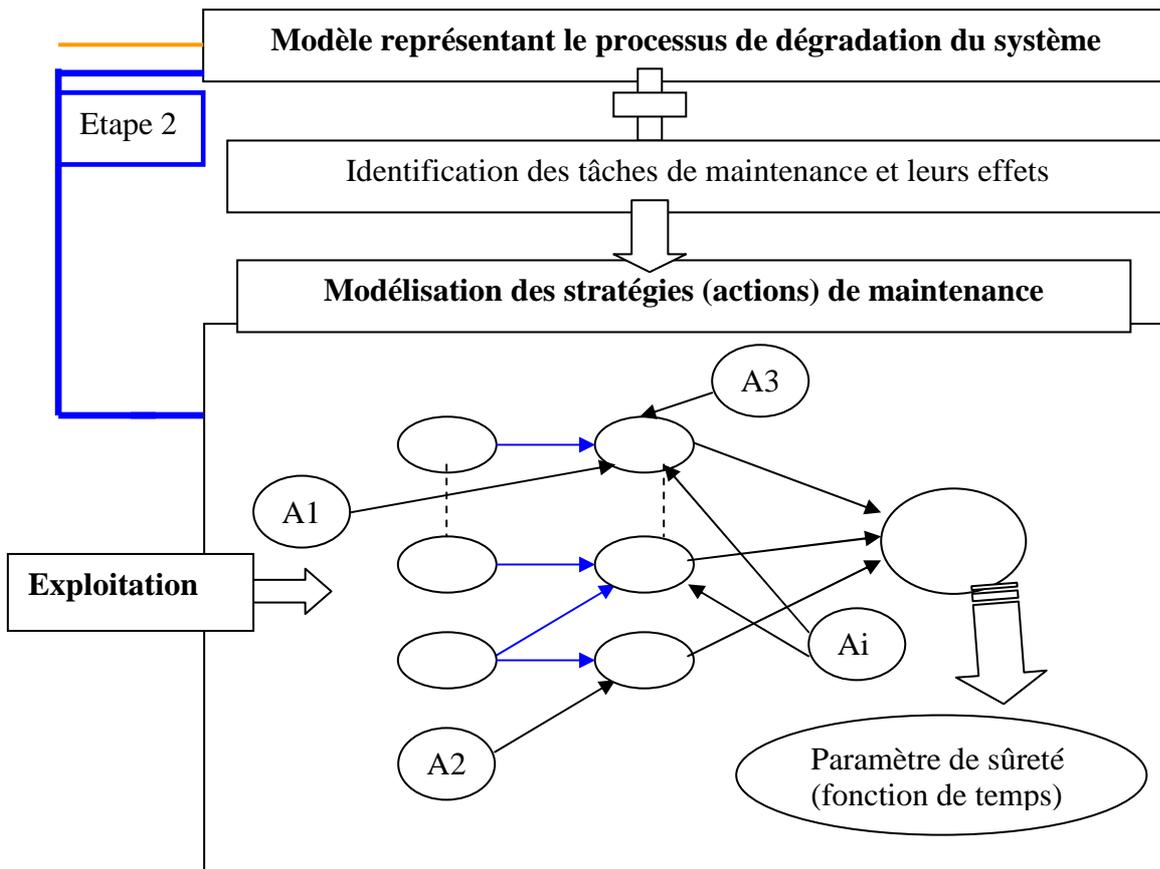


Fig. III. 5. Les étapes de l'approche.

## II. Présentation du système industriel

Dans la partie précédente, une méthodologie de modélisation et d'évaluation de la fiabilité dynamique a été présentée. Cette approche méthodologique sera appliquée, dans le chapitre suivant (IV), sur une souffleuse de préformes PET d'une ligne de production de boisson de l'entreprise Atlas Botling Corporation (Pepsi).

### II. 1. Choix de l'équipement

La ligne de production (SIG) de boisson gazeuse PET de l'entrée des préformes jusqu'à la sortie des bouteilles de boisson gazeuse fardelées et emballées est schématisée comme suit :

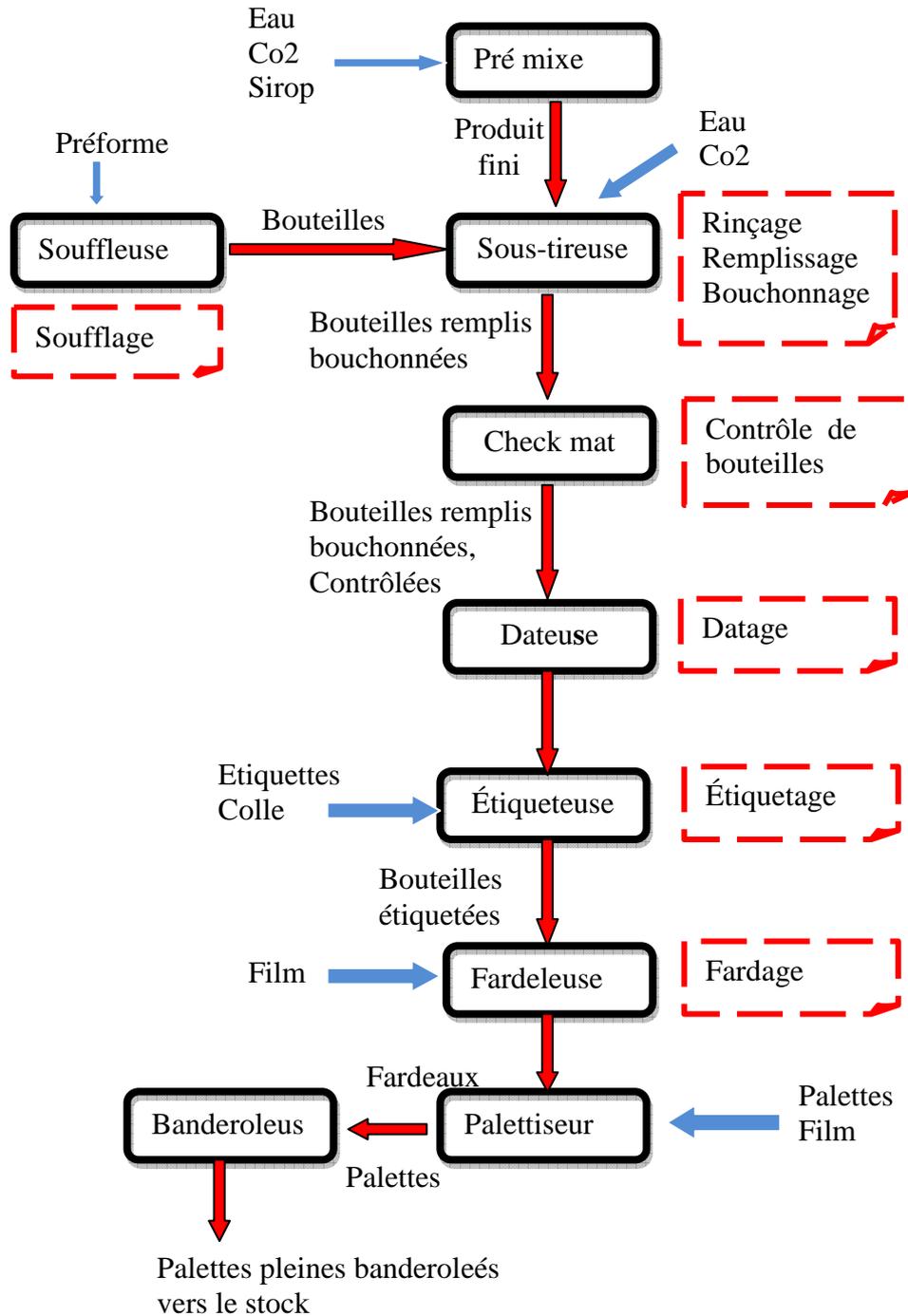


Fig. III. 6. Ligne de production (SIG).

Dans cette figure est montrée la ligne PET (SIG) de production de boisson gazeuse PEPSI de format 0.5l ou 2l selon la configuration des machines. En début de ligne, on distingue la matière première se présentant en préforme et à la sortie des bouteilles de boisson gazeuse fardelées et emballées sur des palettes pour être transférées vers le stock.

Le processus de production débute par le déversement des préformes dans un grand bac qui va les mettre une à une sur un convoyeur et transférées vers la souffleuse. Cette dernière, grâce au système d'alimentation en air disposant d'une pression à 40 bars va souffler les préformes prédisposées dans les huit moules pour leurs donner la forme de bouteille. Cette opération terminée, les bouteilles transitent par la sous-tireuse pour le rinçage, le remplissage et le bouchonnage des bouteilles. La préparation et le dosage de la boisson se fait au niveau du pré-mix qui se trouve près de la sous-tireuse, à la sortie de celle-ci se trouve un check mat qui écarte les bouteilles mal remplies. Le reste du processus de production se résume par le transfert des bouteilles à l'aide d'un convoyeur à rouleau vers la dateuse, ensuite l'étiqueteuse, elles transitent par la fardeleuse, le palettiseur et la banderoleuse pour être respectivement datées, étiquetées, fardelées, mises sur palette et banderolées.

Toutes ces machines communiquent entre elles grâce à l'automate qui a pour rôle principal d'éviter les bourrages sur machine. Lorsqu'une machine du processus s'arrête les machines en amont diminuent leur cadence ou s'arrêtent.

De cette chaîne de production, le choix de l'équipement s'est porté sur la souffleuse en collaboration avec le service de la maintenance d'ABC PEPSI pour les raisons suivantes :

- la fréquence élevée des pannes de cette machine,
- la complexité technologique de la machine,
- la maintenabilité de la machine.

## **II. 2. Fonctionnement de la souffleuse**

La machine de soufflage est conçue pour la production automatisée de bouteilles en plastique. Selon le nombre de postes de soufflage, la machine est livrée avec un ensemble de moules de soufflage et les accessoires utiles correspondants aux différents types de bouteilles à produire.

### **II. 2. 1. Processus de transfert**

Les préformes se trouvent dans la trémie de chargement de la chaîne transporteuse inclinée. De là, elles passent dans la trieuse à rouleaux qui aligne les préformes. Celles-ci parviennent au poste de chargement via les rails d'amenée. Elles sont alors envoyées dans l'inverseur de préforme. L'inverseur prend les préformes une par une, les fait pivoter et les transfère dans la pince du poste de chargement. Le poste de chargement place chaque fois une préforme sur un mandrin de transport de la roue de chargement/déchargement. De là, les préformes placées sur des mandrins de transport passent dans la machine. La préforme ou la bouteille produite reste sur le mandrin de transport pendant tout le cycle de la machine. Le poste de transfert I dirige les mandrins de transfert avec leurs préformes sur les porte-mandrins du four linéaire. Le four linéaire contient des boîtes de chauffage avec diffuseurs infrarouge.

A l'extrémité de la zone de chauffage, un pyromètre placé 25 mm au-dessus de l'anneau de support mesure la température des préformes et un autre la température du col des préformes. A partir de la zone de chauffage, les préformes passent du poste de transfert II aux postes de soufflage de la roue de soufflage. Les mouvements du poste de soufflage sont commandés par cames :

- Ouvrir/fermer le moule de soufflage,
- Lever/baisser le moule au sol,
- Verrouiller/déverrouiller le moule de soufflage,

- Lever/baisser la tige d'élongation,
- Lever/baisser le piston de raccordement.

Les cames « Verrouiller moule de soufflage » et « Déverrouiller moule de soufflage » sont orientables. Le processus de soufflage se compose du processus d'étirage et d'un processus de soufflage en deux phases. La première phase de pressage (P1) sert au soufflage de la bouteille tandis que la deuxième phase, plus intense, sert au formage du contour de la bouteille et au pressage de la paroi de la bouteille sur le moule.

Une fois le processus de soufflage terminé, les moules de soufflage s'ouvrent et le poste de transfert II envoie les mandrins de transport avec les bouteilles produites dans la roue de chargement/déchargement. De là, les bouteilles passent dans la roue inversive. Dans cette dernière, les bouteilles sont aspirées ou saisies par des pinces et retirées des mandrins de transport. Les bouteilles sont transportées hors de la machine par une sortie conçue à cet effet via des rails-guides et un flux d'air.

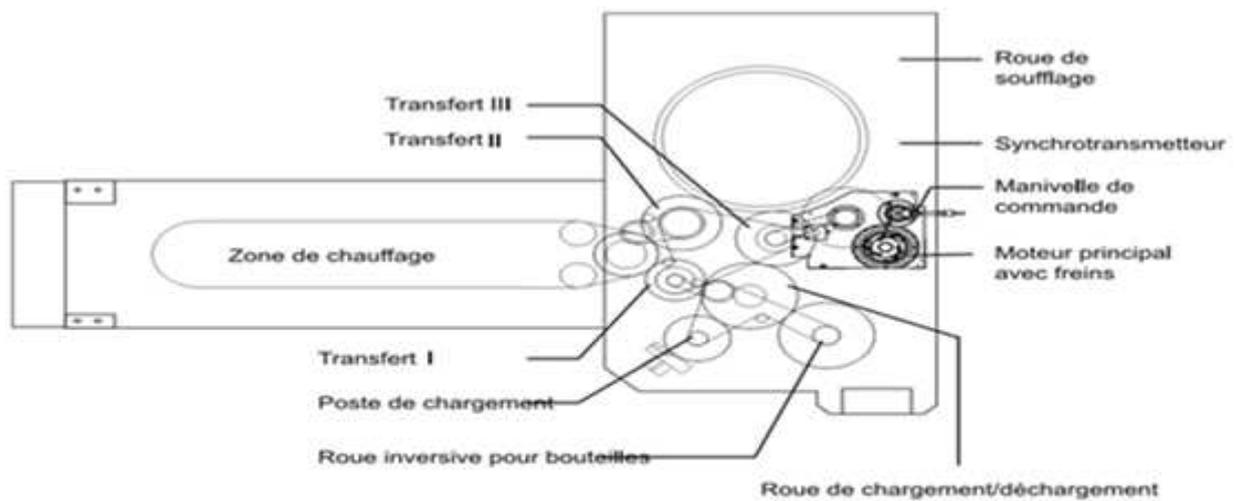


Fig. III. 7. Vue de dessus de la souffleuse.

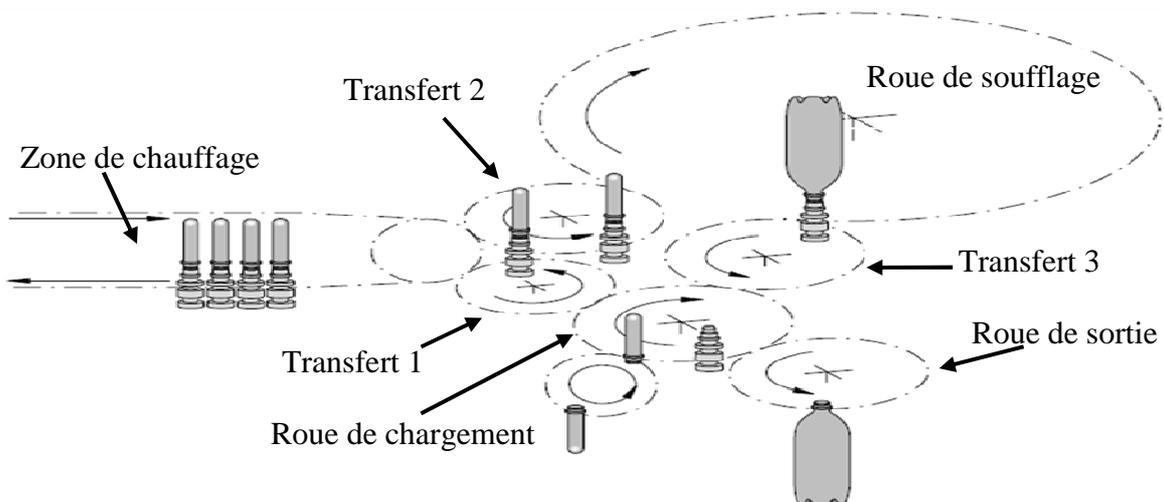
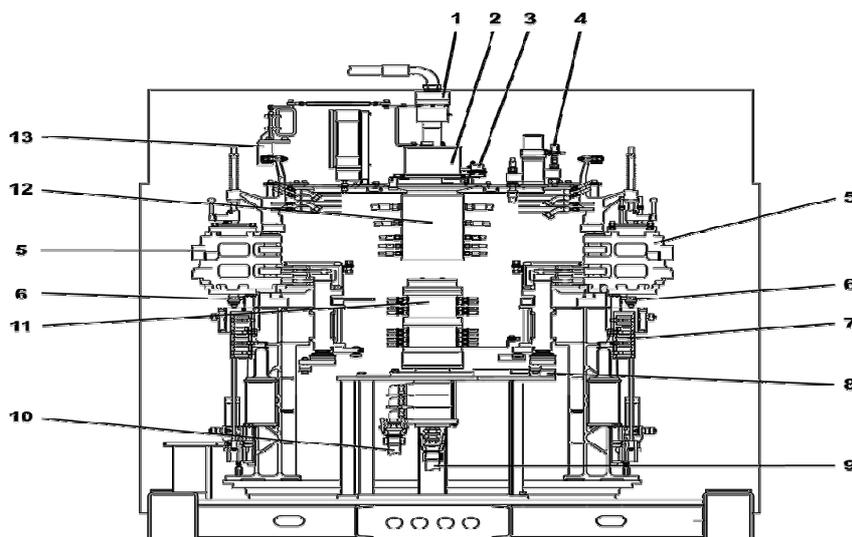


Fig. III. 8. Trajet des mandrins et des roues de transfert (Processus de transfert).

## II. 2. 2. Processus de soufflage

Le processus de soufflage se compose des étapes suivantes :

- Une préforme chauffée est placée dans le moule de soufflage ouvert,
- Le moule de soufflage se ferme, la tige d'élongation avance progressivement, d'abord dans le mandrin de transport puis, lorsque le moule de soufflage est verrouillé, dans la préforme jusqu'à son extrémité,
- Le piston de raccordement se connecte hermétiquement au mandrin de transport,
- Lorsque la tige d'élongation a atteint le bout de la préforme, l'air de soufflage P1 est enclenché via une soupape haut débit. Une alimentation de P1 restreinte permet de contrôler la formation de la « bulle de bouteille » et donc une répartition homogène du matériau,
- La pression de soufflage P1 est désactivée et la pression de soufflage P2 activée, la bulle de bouteille est pressée sur la paroi du moule avec une pression bien plus élevée. Ce système permet ainsi de former les contours les plus fins de la bouteille,
- Le processus de soufflage est terminé lorsque l'air de soufflage P2 est coupé via la soupape haut débit P2 et lorsque l'air de soufflage est évacué via le piston de raccordement et la soupape haut débit dans le silencieux,
- Le piston de raccordement s'abaisse, le moule de soufflage est déverrouillé et s'ouvre, la bouteille terminée est extraite du moule de soufflage ouvert.



Tabl. III. 3. Nomenclature des composants de la roue de soufflage.

Rep	Désignation	Rep	Désignation
1	Entrée d'air	8	Came (ouvrir/fermer moule de soufflage)
2	Appareil de transfert de bague collectrice	9	Retour d'eau
3	Indicateur de mouvement angulaire	10	Afflux d'eau
4	Postes de réduction d'air comprimé	11	Distributeur d'eau tournant
5	Postes de soufflage	12	Distributeur d'air comprimé tournant
6	Mandrin de transport	13	Came (lever moule de fond)
7	Soupape haute pression/poste de soufflage		

### II. 3. Décomposition de la machine

La décomposition de la machine en sous systèmes et composants a été réalisée à l'aide de l'analyse fonctionnelle. La configuration obtenue est la suivante :

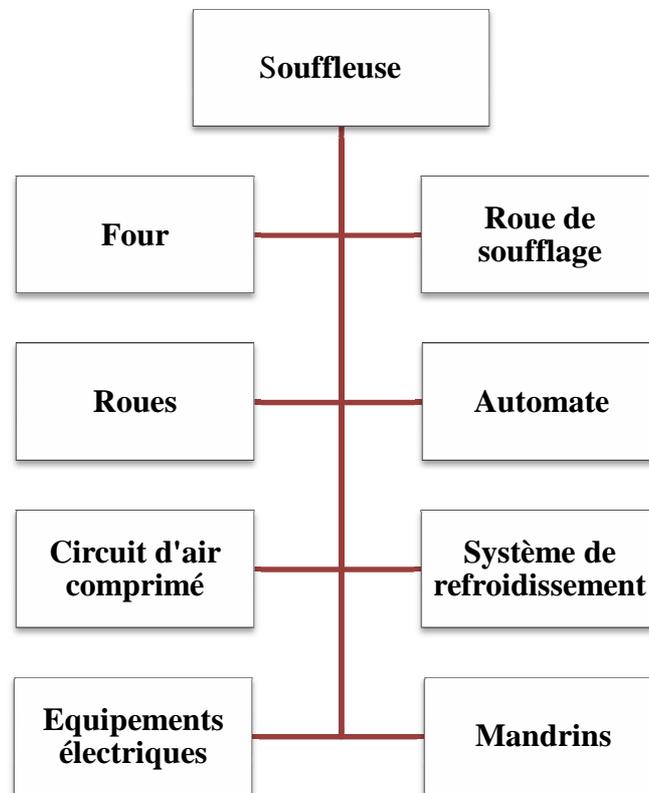


Fig. III. 10. Décomposition de la souffleuse.

Cette décomposition mérite quelques explications sur les sous systèmes et leurs composants.

➤ **Le four linéaire**

Le poste de transfert I envoie les préformes sur la zone de chauffage, le système de sélection des préformes se trouve au début de la zone de chauffage. Les préformes qui n'ont pas été placées correctement sur le mandrin de transport sont repérées par un détecteur de forme, projetées vers le haut par une brève impulsion d'air à travers le mandrin de transport et évacuées par la glissière à rebuts. Près des boîtes de chauffage (four linéaire), les mandrins de transport et leurs préformes se déplacent en tournant sur une chaîne fixe pour permettre une thermorégulation homogène des préformes. Des panneaux de refroidissement protègent le col des préformes et les mandrins de la hausse de température. Chaque boîte de chauffage contient 9 diffuseurs infrarouges créant chacun un niveau. Le chauffage est commandé par un système de réglage automatique composé d'un pyromètre, d'un régulateur à action proportionnelle et intégrale numérique, des diffuseurs, des régulateurs de puissance et de l'électronique (Fig. III. 11).

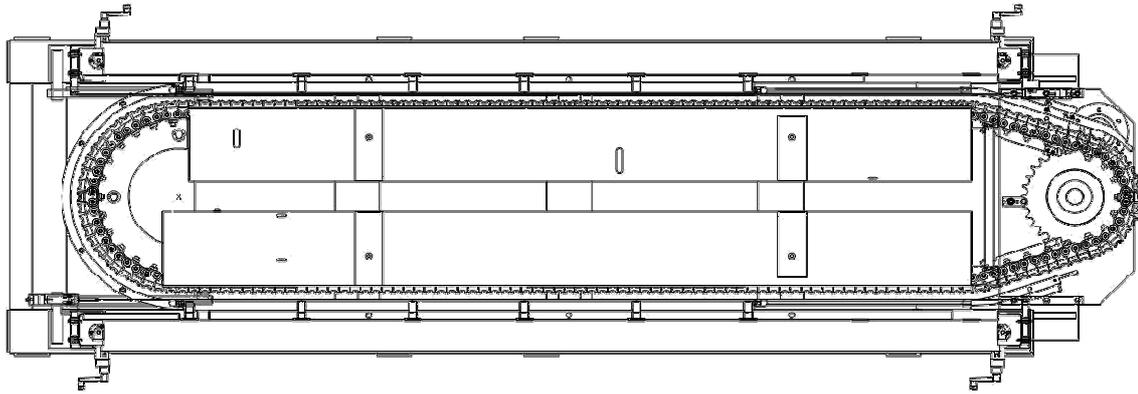


Fig. III. 11. Vue de dessus du four linéaire.

### ➤ La roue de soufflage

La roue de soufflage de la machine contient huit postes de soufflage indiqués dans la Fig. III. 9, comprenant chacun :

- Dispositif de démoulage au sol avec système de serrage rapide pour raccordement à l'eau et moulage au sol,
- Système d'ouverture et de fermeture des demi-moules,
- Piston de raccordement,
- Système d'étirage,
- Support droit du moule de soufflage,
- Demi-moules gauche et droit avec moulage au sol,
- Verrouillage du moule de soufflage.

Les mandrins de transport sont transférés du poste de transfert II au poste de soufflage avec les préformes attachées. La roue de soufflage est équipée de postes de soufflages dans lesquels les préformes sont soufflées pour devenir des bouteilles.

L'électricité et l'air arrivent par le haut tandis que l'eau de refroidissement est amenée et évacuée par le bas. L'alimentation en air s'effectue en un palier de pression. Au centre, les postes de réduction d'air comprimé créent les pressions suivantes :

- P1 Air de soufflage,
- A10 Soupapes d'air de commande,
- A20 Pression d'étirage.

### ➤ Les roues

La roue de chargement /déchargement : l'inverseur fait pivoter les préformes de 180° et les conduit via le réceptacle de la roue de chargement au point de transfert de la roue de chargement/déchargement (Fig. III. 12). Dans la roue de chargement/déchargement, les préformes sont placées sur des mandrins de transport et transportées avec ces derniers par la machine. La roue de chargement/déchargement a deux tâches.

Les préformes du poste de chargement sont placées sur les mandrins de transport et envoyées dans le poste de transfert I.

Le poste de transfert III envoie les bouteilles produites sur la roue de chargement/déchargement. Le support de mandrin remonte alors et retire le mandrin de transport du col de la bouteille. La roue de chargement/déchargement envoie la bouteille sur le réceptacle de la roue inverseuse pour bouteilles.

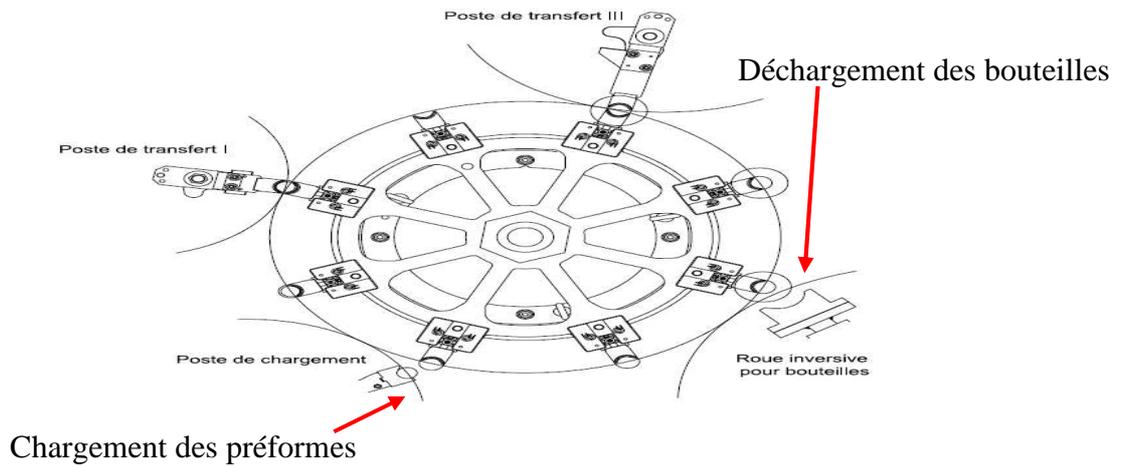


Fig. III. 12. Roue de chargement/déchargement.

Les roues de transfert : On distingue trois roues de transfert

*Roue de transfert I* : les mandrins de transport avec les préformes passent par la roue chargement/déchargement. Le poste de transfert I envoie les mandrins de transport et leurs préformes dans les porte-mandrins de la zone de chauffage.

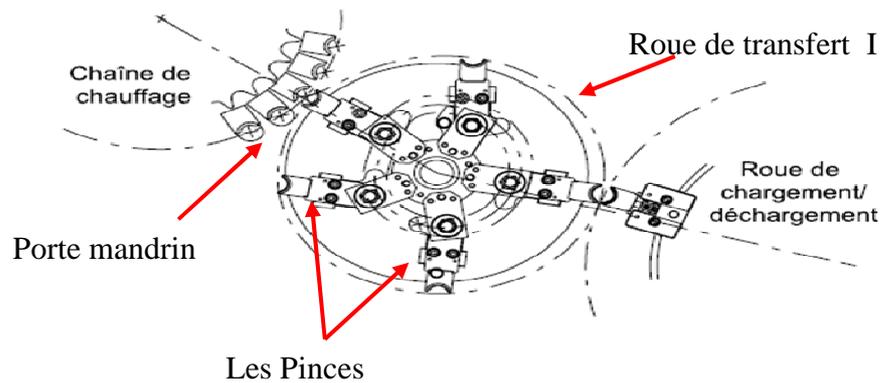


Fig. III. 13. Roue de transfert I.

*Roue de transfert II* : elle prélève les mandrins de transport avec les préformes thermo-régulées de la zone de chauffage et les envoie dans le poste de soufflage.

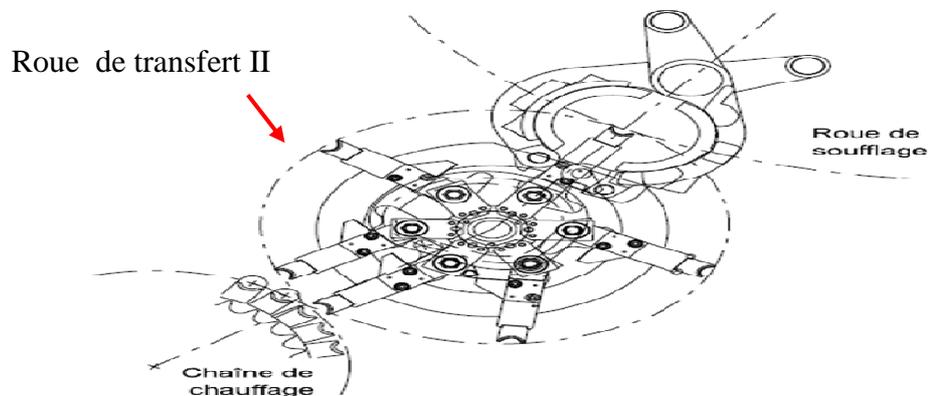


Fig. III. 14. Roue de transfert II.

*Roue de transfert III* : les bouteilles soufflées passent du poste de soufflage au poste de transfert II. Le poste de transfert III fait passer les bouteilles sur la roue de chargement/déchargement.

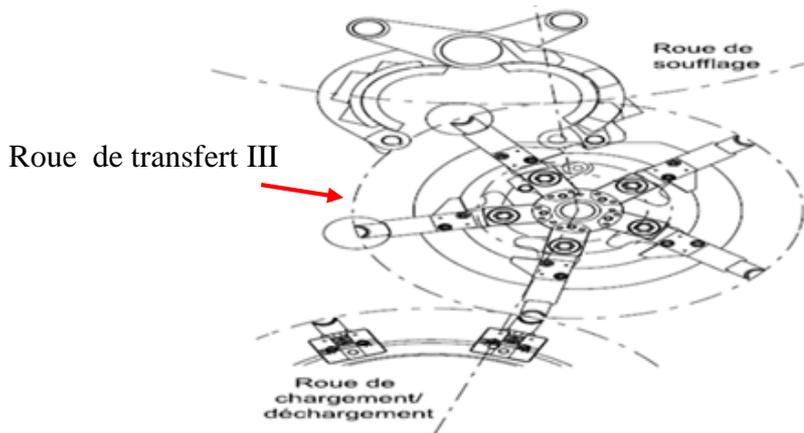


Fig. III. 15. Roue de transfert III.

➤ **Système automate**

Les fonctions principales de ce système sont la gestion et la régulation de la chauffe, le cadenceur pour les préformes, le control du chargement, le système d'éjection, le compteur préformes/bouteilles et le contrôle de la roue de soufflage.

➤ **Système d'alimentation en air (Pneumatique)**

Le schéma pneumatique de la souffleuse de la ligne SIG, se compose de 3 parties essentielles :

- la partie alimentation en air sous pression,
- la partie roue de soufflage,
- et la partie annexe.

L'air arrive à 40 bar minimum à l'entrée du circuit, passe par une soupape de déchargement de 50 bar et un filtre puis est séparé en 2 parties : une partie est destinée à être régulée et distribuée dans le circuit annexe qui se compose de quelques organes pneumatiques (essentiellement des vérins), et l'autre partie de l'air va passer par un régulateur de pression pour avoir la pression P2, ensuite passer par le dispositif d'air rotatif pour être transmis à la roue de soufflage qui est en rotation.

Dans la roue de soufflage l'air est partagé en quatre parties :

- P2 est conduit directement au distributeur de soufflage sans traitement particulier,
- P1 est régulé par un régulateur de pression ensuite conduit vers le distributeur de soufflage,
- A10 est l'air de commande du distributeur de soufflage, il va être régulé à une certaine pression à l'aide d'un détendeur et d'un pressostat pour être dirigé vers la commande des distributeurs. La commande des distributeurs de l'air A10 se fait par commande électrique, et cet air va commander la distribution des airs de soufflage P1 et P2 ainsi que leur échappement par commande pneumatique.
- A20 est l'air de commande du vérin de la tige d'élongation, régulé à une certaine pression à l'aide d'un détendeur et d'un pressostat pour être dirigé vers le distributeur du vérin de la tige d'élongation. Cet air joue le rôle d'air de sécurité pour la tige d'élongation, dans le cas où il y a pas de préforme ou cette dernière n'est pas à la température idéale pour le soufflage, l'air A20 s'évacue du vérin de maintien de la tige d'élongation et la libère du chariot pour ne pas monter.

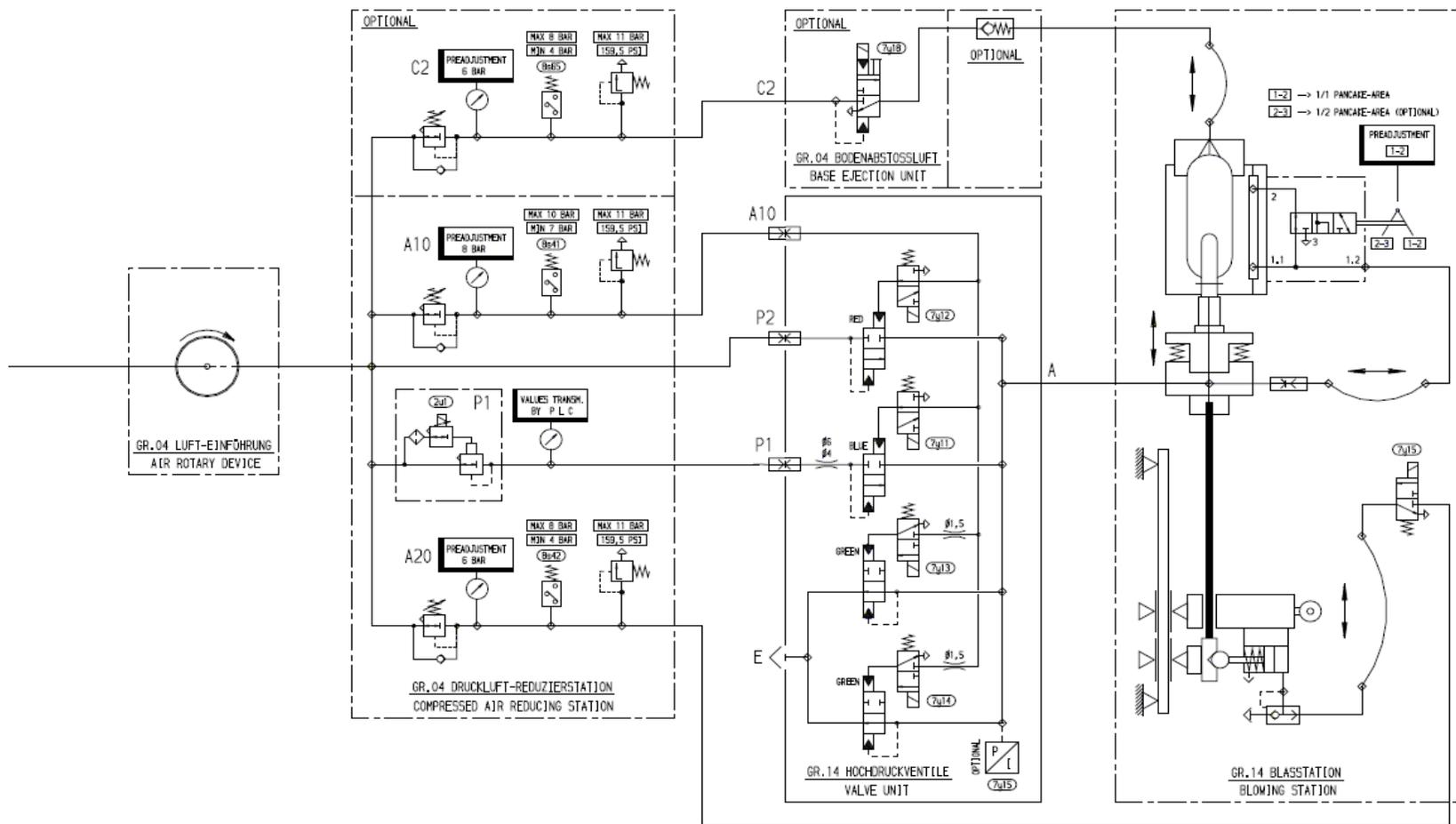


Fig. III. 16. Système d'alimentation en air.

➤ **Système de refroidissement (hydraulique)**

La machine est raccordée au circuit d'eau de refroidissement par des flexibles. L'eau de refroidissement doit être d'une qualité équivalente à celle d'une eau potable normale et ne doit pas contenir d'impuretés. L'eau froide arrive à la machine à travers un système de refroidissement (radiateur). Les composants suivants sont raccordés au système de refroidissement à l'eau :

- moules de soufflage et moules de fond,
- panneau de refroidissement devant les boîtes de chauffage,
- refroidisseur d'armoire de distribution.

➤ **Le mandrin de transport**

Les mandrins sont les éléments responsables de transport pendant tout le processus de production de l'entrée des préformes jusqu'à la sortie des bouteilles.

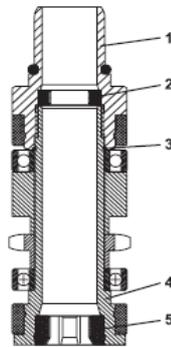


Fig. III. 17. Le mandrin de transport et ses composants.

Tabl. III. 4. Nomenclature des composants du mandrin.

Rep	Désignation
1	Insert de mandrin
2	Douille de guidage supérieure
3	Joint torique
4	Corps du mandrin
5	Douille de guidage inférieure

**Conclusion**

Dans ce chapitre, la méthodologie pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement d'un système industriel a été décrite suffisamment pour la mettre en application. La démarche est structurée autour des réseaux bayésiens dynamiques permettant de modéliser le comportement des systèmes dynamiques.

Pour la partie expérimentale réservée au chapitre IV, une présentation indispensable a été faite sur le fonctionnement de la souffleuse et les interactions de ses sous systèmes.

CHAPITRE **IV** **Application**

---

A présent que la méthodologie et le système industriel, la souffleuse, ont été présentés, il est proposé dans ce chapitre de décrire la mise en œuvre de l'application. L'approche choisie comporte deux phases essentielles :

- la première phase a pour objectif la modélisation du comportement du système sans intervention de la maintenance, en procédant au départ à l'analyse séparée des systèmes concernés et ensuite les regrouper,

- la deuxième phase consistera en la définition du modèle de la même manière mais en intégrant les stratégies de maintenance.

## I. Modélisation du comportement du système sans intervention de la maintenance

Cette étape a pour objectif d'élaborer un modèle représentant le processus de dégradation du système sans intervention de la maintenance. Celle pratiquée actuellement sur cet équipement est principalement curative. La phase s'entame par la modélisation de la dégradation des différents composants et sous systèmes.

### I. 1. Modélisation de la dégradation des composants

La modélisation commence en procédant à la définition de la fonction et du mode de défaillance de chaque composant et sous système (*Tabl. IV. 1*).

*Tabl. IV. 1. Fonction et modes de défaillance des composants et sous systèmes.*

Composants	Fonctions	Modes de défaillance
<i>Four</i>	<i>Chauffage des préformes.</i>	<i>Température incorrecte</i>
<i>Roue de soufflage</i>	<i>Soufflage des préformes.</i>	<i>Soufflage non-conforme et blocage du moule.</i>
<i>Système de refroidissement</i>	<i>Refroidissement moules de soufflage et de fond, refroidissement des panneaux devant les boîtes de chauffage.</i>	<i>Elévation de la température</i>
<i>Circuit d'air comprimé</i>	<i>Asservissement du système pneumatique, Traitement de l'air de soufflage.</i>	<i>Manque de pression</i>
<i>Roues</i>	<i>L'acheminement des préformes et bouteilles.</i>	<i>Blocage du mouvement</i>
<i>Mandrins</i>	<i>Transfèrement de la préforme</i>	<i>Usure</i>
<i>Automate</i>	<i>Gestion, régulation, contrôle, compteur.</i>	<i>Arrêt</i>
<i>Equipements électriques</i>	<i>Commande, Puissance.</i>	<i>Mauvaise alimentation</i>

Ensuite, il était indispensable d'établir les différents états des composants et sous systèmes, et leurs taux de défaillance intrinsèque (*Tabl. IV. 2*).

La détermination des taux de défaillance intrinsèque en l'état actuel, s'est faite essentiellement par l'analyse de l'historique des pannes et calculés par la formule suivante  $\lambda = \frac{1}{MTBF}$  (IV. 1). Par contre, pour les composants ayant des dépendances fonctionnelles, de cette estimation il fallait aussi déduire la part de l'effet des différents mécanismes de dégradation des éléments influant, estimée par l'expert à 10% de la valeur calculée. D'autre part, tous les éléments sont non autoréparables.

Tabl. IV. 2. Etats et taux de défaillance intrinsèque des composants et sous systèmes.

Composants	Modalités (états)	Taux de défaillance intrinsèque estimé ( $h^{-1}$ )
<i>Four</i>	<i>Bon (<math>T^\circ</math> correcte)</i> <i>Défaillant (<math>T^\circ</math> incorrecte)</i>	$\lambda \approx 0,013$
<i>Roue de soufflage</i>	<i>Bon (soufflage conforme)</i> <i>Défaillant (soufflage non-conforme et blocage de moule)</i>	$\lambda \approx 0,0012$
<i>Système de refroidissement</i>	<i>Bon (refroidissement correct)</i> <i>Défaillant (mauvais refroidissement)</i>	$\lambda \approx 0,001$
<i>Circuit d'air comprimé</i>	<i>Bon (asservissement et traitement correct)</i> <i>Défaillant (mauvais asservissement et traitement)</i>	$\lambda \approx 0,0016$
<i>Roues</i>	<i>Bon (transfert synchronisé)</i> <i>Défaillant (blocage du mouvement)</i>	$\lambda \approx 0,0028$
<i>Mandrins</i>	<i>Bon</i> <i>Défaillant (usé)</i>	$\lambda \approx 0,0068$
<i>Automate</i>	<i>Bon</i> <i>Défaillant (arrêt)</i>	$\lambda \approx 0,00188$
<i>Equipements électriques</i>	<i>Bon</i> <i>Défaillant (mauvaise alimentation)</i>	$\lambda \approx 0,00188$

A titre d'illustration de la démarche de l'analyse, il est décrit ci-dessous le modèle représentant l'évolution de l'état du composant "four", *considéré séparément des autres composants*, dans l'intervalle de temps  $t$  à  $t+1$ . La même démarche est utilisée pour les autres composants mentionnés dans le *Tabl. IV. 2*.



Fig. IV. 1. Topologie indiquant la dégradation du four.

En conséquence, la table de probabilité conditionnelle obtenue est la suivante (*Tabl. IV. 3*).

Tabl. IV. 3. Table de probabilité conditionnelle du nœud  $four_{t+1}$ .

$Four_t$	$P(Four_{t+1}/Four_t)$	
	Température correcte	Température incorrecte
Température correcte	$1-0,013\Delta t$	$0,013\Delta t$
Température incorrecte	$0$	$1$

Pour une unité de temps ( $\Delta t$ ) égale à 1 heure, l'évolution du comportement du four est la suivante.

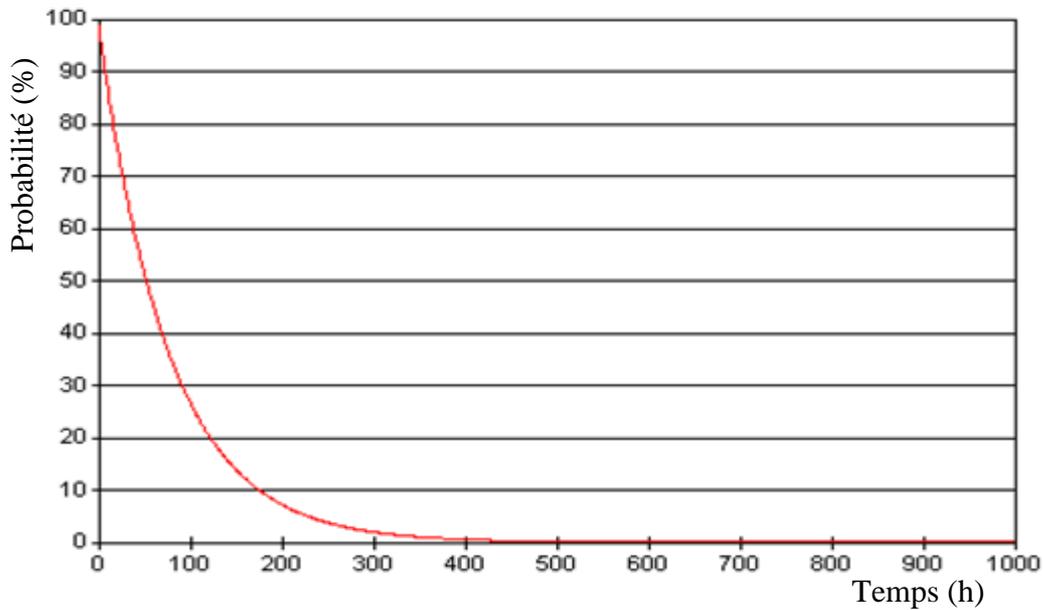


Fig. IV. 2. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement du four.

Le bon fonctionnement du four est conditionné par la température au niveau de la préforme qui doit être située à 117°C et à 6°C au niveau de col. Or, de cette courbe, il est à remarquer que la probabilité du maintien de la bonne température n'est que de 7.585% sur l'intervalle  $[0, 1000h]$ . Cela s'explique en grande partie au problème récurrent de mise en route des lampes infrarouges et leurs brûlures.

### I. 2. Modélisation des dépendances fonctionnelles entre les composants

La modélisation de la dégradation des composants (illustrer par l'exemple du composant "four") précédemment effectuée ne prend pas en compte l'influence mutuelle et les dépendances qui peuvent exister entre les différents mécanismes de dégradation. Un état d'un composant peu être caractérisé par plusieurs régimes de dégradation selon l'état des autres éléments qui lui sont liés du même système.

Dans le tableau ci-dessous sont recensés les éléments influant sur la dégradation de chaque composant.

Tabl. IV. 4. Présentation des dépendances fonctionnelles.

Composants	Modes de défaillance	Eléments influant
<i>Four</i>	<i>Température incorrecte</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Système de refroidissement</i></li> <li>• <i>Equipements électriques</i></li> </ul>
<i>Roue de soufflage</i>	<i>Soufflage non-conforme et blocage du moule</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Circuit d'air comprimé</i></li> <li>• <i>Système de refroidissement</i></li> </ul>
<i>Système de refroidissement</i>	<i>Elévation de la température</i>	
<i>Circuit d'air comprimé</i>	<i>Manque de pression</i>	
<i>Roues</i>	<i>Blocage du mouvement</i>	
<i>Mandrins</i>	<i>Usure</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Four</i></li> </ul>
<i>Automate</i>	<i>Arrêt</i>	
<i>Equipements électriques</i>	<i>Mauvaise alimentation</i>	

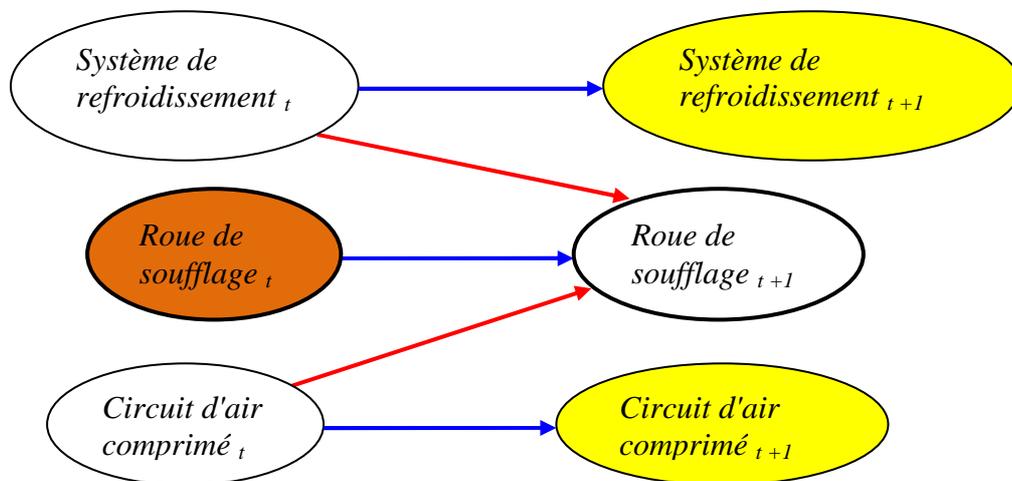
La dépendance de l'état du four avec le système de refroidissement et les équipements électriques est caractérisée par l'alimentation des lampes infrarouges et le refroidissement des panneaux au niveau du four. Par conséquent, si le système de refroidissement est défaillant, la température ne peut pas être correcte. De même pour les équipements électriques, ces derniers sont responsables de l'alimentation des lampes infrarouges. L'automate n'est pas pris comme élément influant, car sa défaillance provoque un arrêt quasi instantané de la machine.

La dépendance entre l'état de la roue de soufflage avec le circuit d'air comprimé et le système de refroidissement : pour que le processus de soufflage soit assuré, la roue doit être alimentée en air comprimé et en eau pour le refroidissement (chap.III. § (II. 3)). Donc, la probabilité que le processus de soufflage soit réalisé dépend de la probabilité de défaillance intrinsèque de la roue de soufflage et aussi de la probabilité des états des deux systèmes.

La dépendance entre l'état des mandrins et celui du four se distingue par l'influence de la température du four sur la vitesse d'usure des mandrins. Une température incorrecte au niveau du col, entraîne une vitesse d'usure plus rapide.

**La modélisation de la dégradation des composants étudiés en fonction des effets de leurs dépendances est illustrée par les exemples suivants.**

1) Le modèle ci-dessous représente l'évolution de l'état de **la roue de soufflage** dans l'intervalle de temps  $t$  à  $t+1$  avec **ses dépendances** fonctionnelles représentées par les arcs en rouges. Ce qui signifie que l'état de la roue de soufflage à  $t+1$ , est fonction de sa dégradation influencé par les différents mécanismes de dégradation des éléments influant.



*Fig. IV. 3. Topologie indiquant la dégradation de la roue de soufflage avec ses dépendances fonctionnelles.*

Pour cette configuration, la table indiquant les probabilités conditionnelles de la roue de soufflage est indiquée ci-dessous.

Tabl. IV. 5. Table de probabilité conditionnelle de la roue de soufflage  $t+1$ .

			<i>P (Roue de soufflage <math>t+1</math>/ Roue de soufflage <math>t</math>, Système de refroidissement <math>t</math>, Circuit d'air comprimé <math>t</math>).</i>	
Circuit d'air comprimé $t$	Système de refroidissement $t$	Roue de soufflage $t$	Bon (soufflage conforme)	Défaillant (soufflage non-conforme)
<i>Bon</i>	<i>Bon</i>	<i>Bon</i>	$1-0,00132\Delta t$	$0,00132\Delta t$
		<i>Défaillant</i>	$0$	$1$
	<i>Défaillant</i>	<i>Bon</i>	$0$	$1$
		<i>Défaillant</i>	$0$	$1$
<i>Défaillant</i>	<i>Bon</i>	<i>Bon</i>	$0$	$1$
		<i>Défaillant</i>	$0$	$1$
	<i>Défaillant</i>	<i>Bon</i>	$0$	$1$
		<i>Défaillant</i>	$0$	$1$

La valeur  $0,00132\Delta t$  correspond à la probabilité de défaillance de la roue de soufflage en prenant en considération les effets de ses dépendances caractérisés par la probabilité de dégradation du circuit d'air et celle du système de refroidissement(IV. 1).

Les autres probabilités sont égales à  $1$ , car si le circuit d'air et/ou le système de refroidissement est défaillant à l'instant  $t$ , le soufflage à  $t+1$  sera non-conforme.

Pour une unité de temps ( $\Delta t$ ) égale à  $1$  heure, l'évolution du comportement du composant Roue de soufflage et de ses différentes dépendances (Circuit d'air et Système de refroidissement) représentés dans la Fig. IV. 3, et étudiée sur deux intervalles de temps  $[0,100h]$  et  $[0,1000h]$  est de la forme suivante.

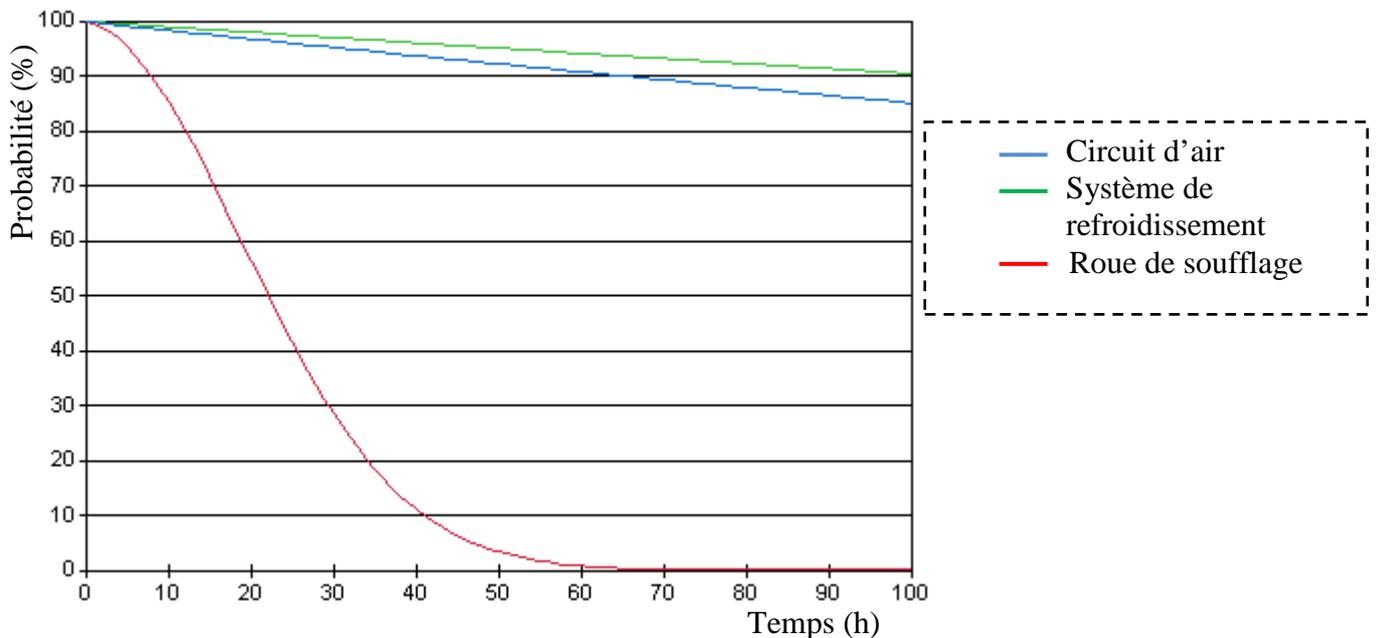


Fig. IV. 4. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement de la roue de soufflage et de ses deux dépendances sur l'intervalle  $[0,100h]$ .

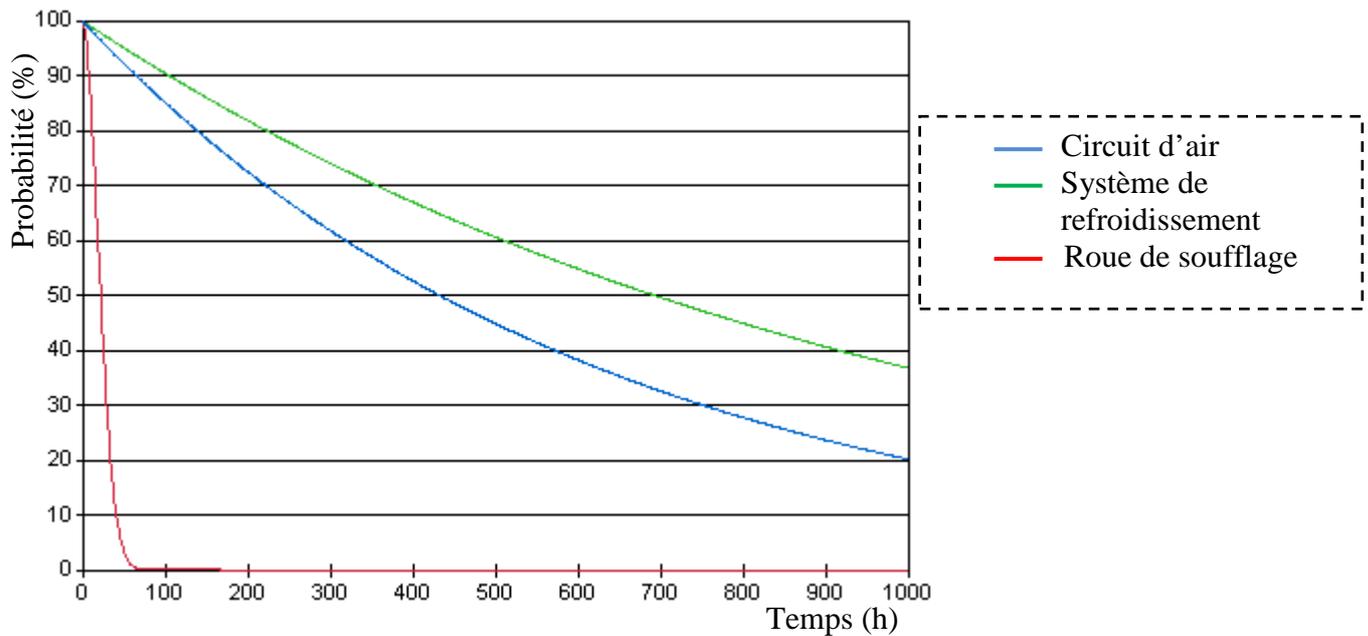


Fig. IV. 5. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement de la roue de soufflage et de ses deux dépendances sur l'intervalle  $[0, 1000h]$ .

Les courbes des deux figures précédentes montrent l'évolution de la probabilité de bon fonctionnement et de la fiabilité sur un intervalle  $[t, t+n]$  de la roue de soufflage en fonction de ses deux dépendances, Les valeurs sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tabl. IV. 6. Valeurs de la fiabilité et de bon fonctionnement.

Composant/ Dépendances	Fiabilité, % sur l'intervalle		Bon Fonct., % à	
	$[0, 100 h]$	$[0, 1000 h]$	$100 h$	$1000 h$
Roue de soufflage	23,825	2,404	0	0
Système de Refroidissement	95,066	63,14	90,39	36,73
Système Circuit d'air comprimé	92,258	49,78	85,07	20,13

A partir de ces résultats, la roue de soufflage à une fiabilité très faible pour un intervalle de temps moyennement minime, et c'est d'autant plus pour vrai pour un temps d'utilisation supérieur ou les probabilités de bon fonctionnement des systèmes de refroidissement et d'air comprimé commencent à chuter. Ce qui signifie que les mécanismes de dégradation des deux éléments en l'occurrence le mauvais refroidissement, et le mauvais asservissement ont un grand impact sur la réalisation de processus de soufflage.

2) Le modèle ci-dessous représente l'évolution de l'état **du four** et **des mandrins** au temps  $t$  à  $t+1$  avec **leurs dépendances** fonctionnelles représentées par les arcs rouges. Nous avons considéré les composants Four et Mandrins, et leurs éléments influant dans un seul modèle au lieu de les séparés, en raison de leur dépendance.

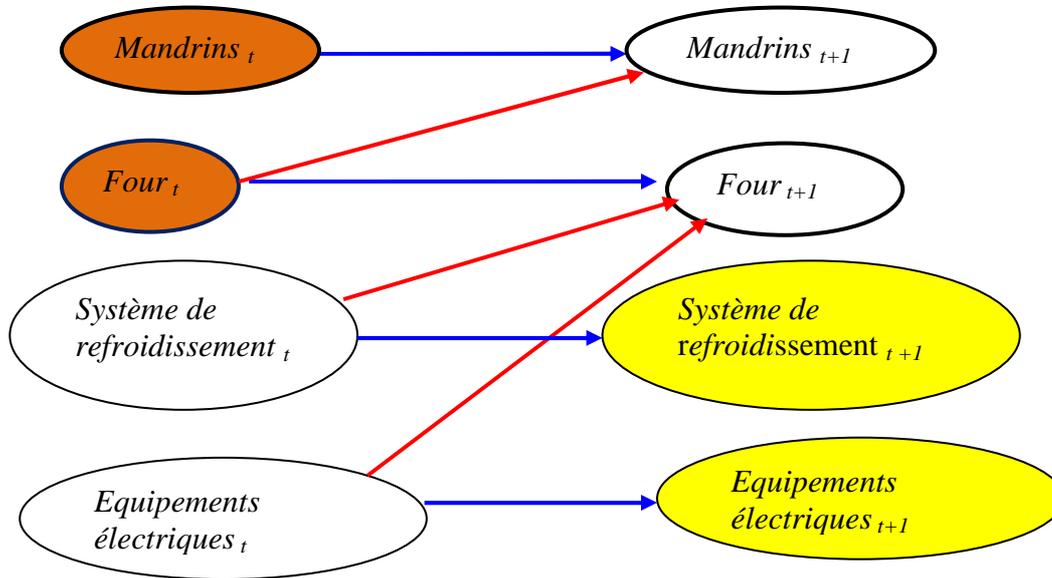


Fig. IV. 6. Topologie indiquant la dégradation du four et des mandrins avec leurs dépendances fonctionnelles.

Pour cette configuration, les tables indiquant les probabilités conditionnelles du four et des mandrins sont indiquées ci-dessous.

Tabl. IV. 7. Table de probabilité conditionnelle du nœud mandrins  $t+1$ .

		$P(\text{Mandrins}_{t+1}/\text{Mandrins}_t, \text{Four}_t)$	
Four $t$	Mandrins $t$	Bon	Défaillant (usé)
Bon	Bon	$1-0,0075\Delta t$	$0,0075\Delta t$
	Défaillant	0	1
Défaillant	Bon	$1-0,008\Delta t$	$0,008\Delta t$
	Défaillant	0	1

Tabl. IV. 8. Table de probabilité conditionnelle du four  $t+1$ .

			$P(\text{Four}_{t+1}/\text{Four}_t, \text{Système de Refroid}_t, \text{Equipements électriques}_t)$	
Equipements électriques $t$	Système de refroidissement $t$	Four $t$	T° correcte	T° incorrecte
Bon	Bon	Bon	$1-0,01442\Delta t$	$0,01442\Delta t$
		Défaillant	0	1
	Défaillant	Bon	0	1
		Défaillant	0	1
Défaillant	Bon	Bon	0	1
		Défaillant	0	1
	Défaillant	Bon	0	1
		Défaillant	0	1

Les informations portées dans les deux tables ci-dessus indiquent :

- Pour les mandrins :  $0,0075\Delta t$  est la probabilité de défaillance des mandrins en prenant en compte l'influence de la probabilité de défaillance de four caractérisée par une température incorrecte calculée par la formule (IV. 1). Par contre, si la température est très élevée au niveau du col, la probabilité que les mandrins soient défaillants dans  $t+1$  augmente, car l'usure est plus rapide et la nouvelle probabilité de défaillance est estimée à  $0,008\Delta t$ .

- Pour le four :  $0,01442\Delta t$  est la probabilité de défaillance du four en prenant en compte l'influence de la probabilité de défaillance des sous systèmes concernés à savoir les équipements électriques et le système de refroidissement calculée par la formule (IV. 1). La probabilité est égale à 1, si l'un ou les deux systèmes sont défaillants. Effectivement, s'il y a une mauvaise alimentation des lampes infrarouges et/ou les panneaux au niveau du four ne sont pas refroidis, la température sera inévitablement incorrecte.

Pour une unité de temps ( $\Delta t$ ) égale à 1 heure, l'évolution du comportement des composants **four** et **mandrins** avec leurs dépendances représentés dans la Fig. IV. 6, étudiée sur deux intervalles de temps  $[0,100h]$  et  $[0,1000h]$  est de la forme suivante.

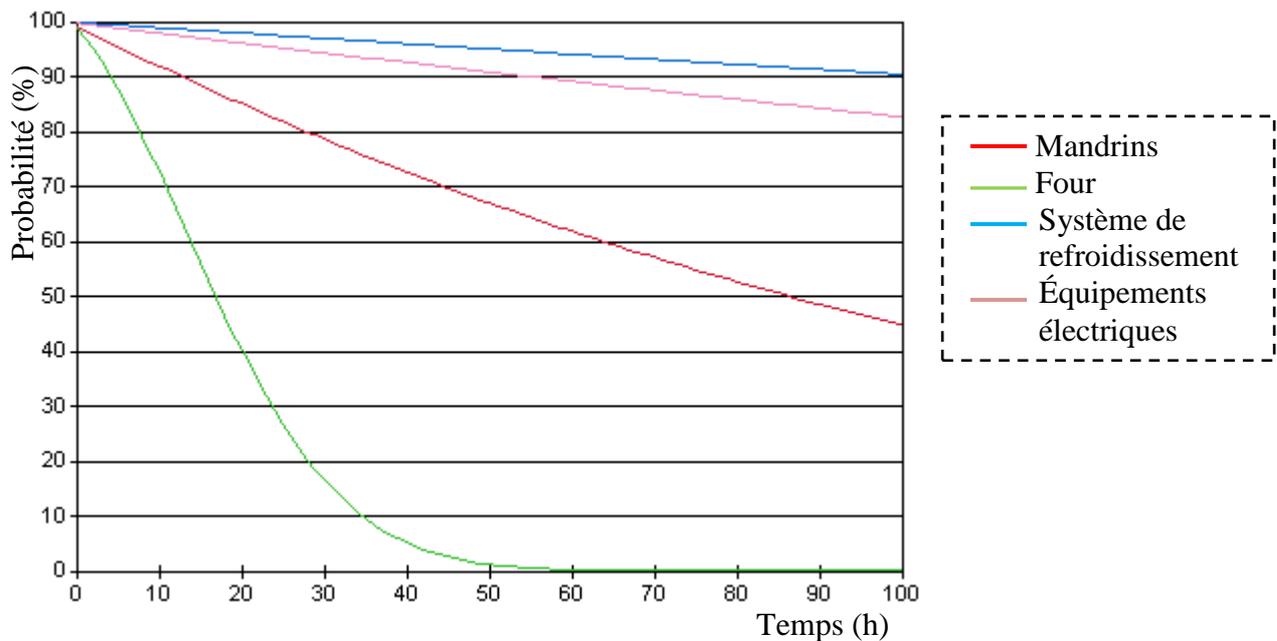


Fig. IV. 7. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement du four et des mandrins avec leurs dépendances  $[0,100h]$ .

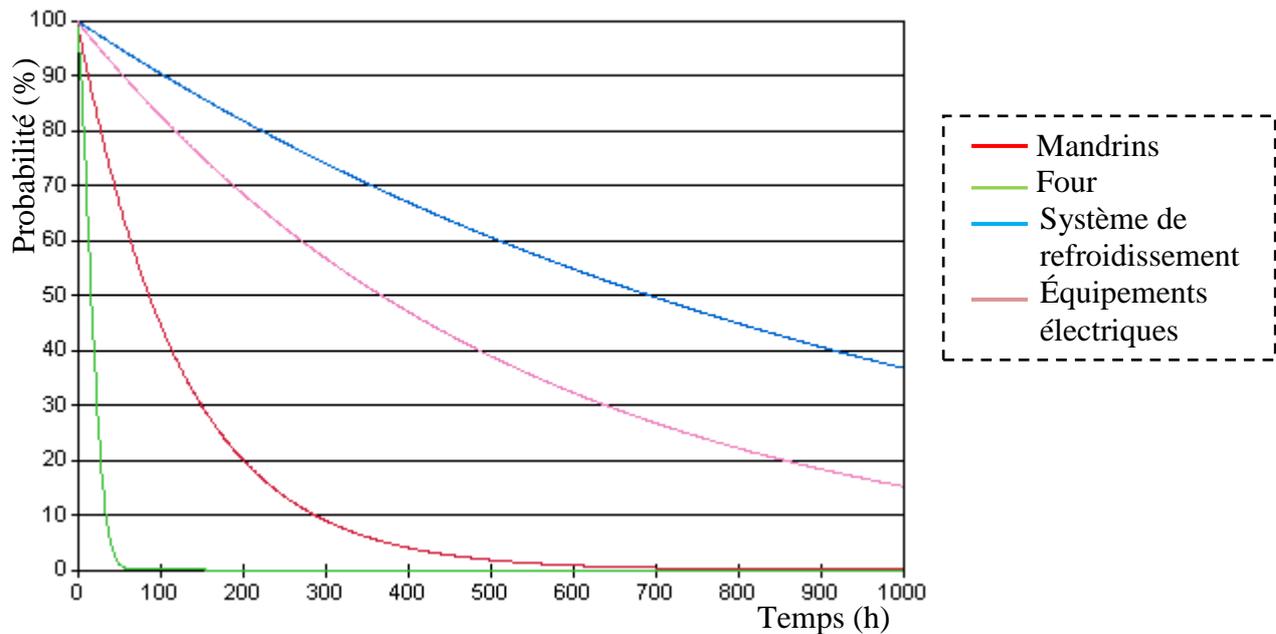


Fig. IV. 8. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement du four et des mandrins avec leurs dépendances sur l'intervalle  $[0, 1000h]$ .

Les courbes des deux figures précédentes montrent l'évolution de la probabilité de bon fonctionnement et de la fiabilité des deux composants **four** et **mandrins** avec leurs **dépendances** considérés sur un intervalle  $[t, t+n]$ . Les valeurs sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tabl. IV. 9. Valeurs de la fiabilité et de bon fonctionnement.

Composant/ Dépendances	Fiabilité, % sur l'intervalle		Bon Fonct., % à	
	$[0, 100h]$	$[0, 1000h]$	$t=100h$	$t=1000h$
Four	18,732	1,890	0	0
Mandrins	68,793	12,497	44,88	0,03
Système de Refroidissement	95,066	63,14	90,39	63,73
Equipements électriques	90,98	44,975	82,69	15,20

A partir de ces résultats, la fiabilité des différents composants diminue d'une manière significative pour l'intervalle de temps  $[0, 1000h]$  comparativement avec  $[0, 100h]$ . Pour le composant "mandrins", en plus de sa probabilité de défaillance intrinsèque, il y a l'influence de la probabilité de bon fonctionnement de four, laquelle est très faible pour des temps d'utilisation très minime. Ce dernier voit aussi sa fiabilité diminuer pour l'intervalle  $[0, 1000h]$  comparativement à son comportement sans la prise en compte des dépendances fonctionnelles (Fig. IV. 2) de 7,85% à 1,89 %.

### I. 3. Réseau global

Dans la démarche retenue, il a été nécessaire de procéder au préalable à l'analyse de chaque composant avec ses dépendances correspondantes séparément, de manière à identifier l'ensemble des nœuds à prendre considération dans l'architecture globale du réseau. Pour compléter ce travail, il fallait également introduire l'effet de l'état de chaque composant et sous système sur l'état de la machine (*Tabl. IV. 10*).

*Tabl. IV. 10. Présentation de l'effet de défaillance des composants sur la machine.*

Composants	Effet de la défaillance de composant sur la machine
<i>Four</i>	<i>Rebut</i>
<i>Roue de soufflage</i>	<i>Arrêt</i>
<i>Système de refroidissement</i>	<i>Rebut</i>
<i>Circuit d'air comprimé</i>	<i>Rebut</i>
<i>Roues</i>	<i>Arrêt</i>
<i>Mandrins</i>	<i>Arrêt</i>
<i>Automate</i>	<i>Arrêt</i>
<i>Equipements électriques</i>	<i>Arrêt</i>

L'analyse fonctionnelle de la machine a permis de déterminer trois états de la machine : l'état marche, arrêt et l'état marche avec rebut.

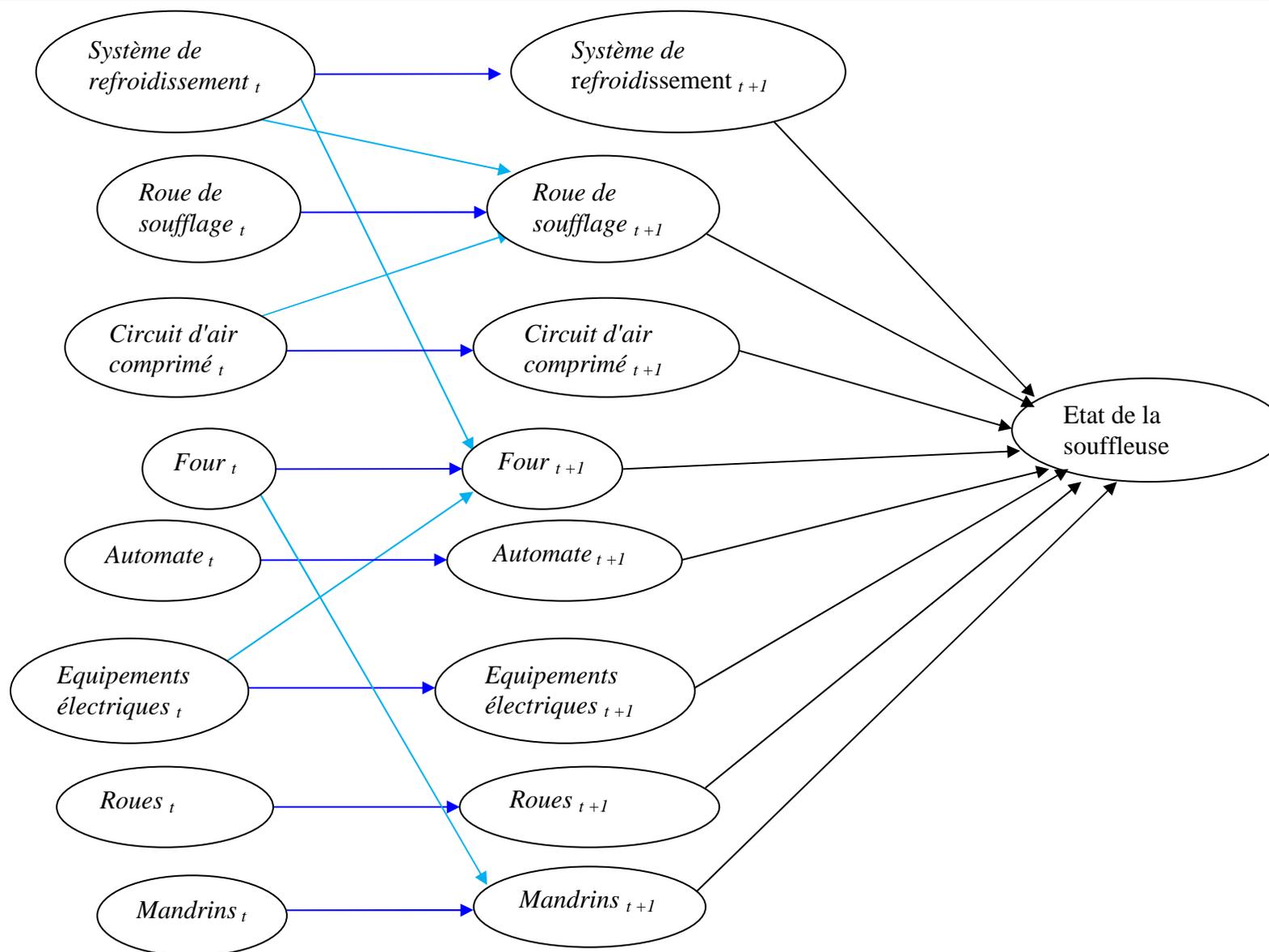
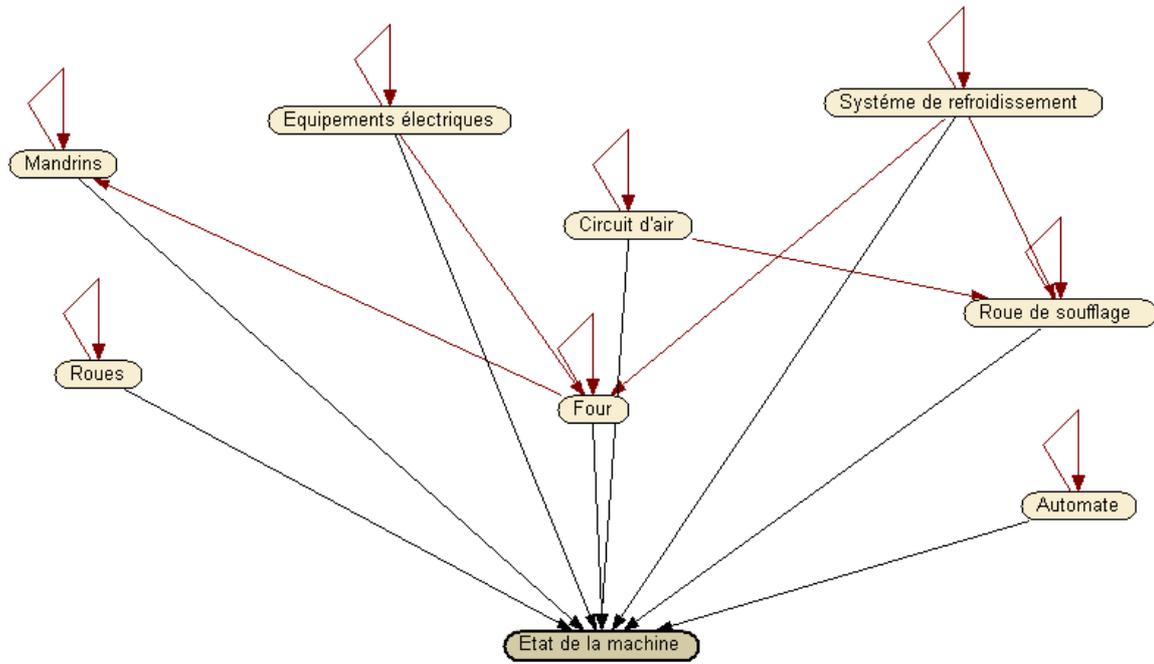


Fig. IV. 9. Topologie représentant le modèle global.

Le logiciel BayesiaLab utilisé (disponible en version démo) limite le nombre de nœuds à 10. Cette contrainte impose de recourir à un autre logiciel. Une présentation des différents logiciels pour les réseaux bayésiens ainsi que leurs caractéristiques proposée par Murphy [Murphy, 2010], a permis de choisir le logiciel Netica (également en version démo). Ce logiciel permet la construction de réseau par une manipulation simple, mais pour la simulation dynamique, le logiciel ne peut aller au delà de dix fois le pas de temps. Ci-dessous l'équivalent de réseau global sous Netica.



*Fig. IV. 10. Présentation de modèle global sous logiciel Netica.*

Dans cette présentation, chaque nœud d'entrée indique un composant ou sous système de la machine, les arcs de couleur noir, sont des arcs synchroniques, ils représentent la relation entre les composants et l'état de la machine. Par contre, les arcs en rouges sont diachroniques, ils représentent quant à eux, l'évolution du comportement des différents composants et sous systèmes en plus de leurs dépendances fonctionnelles.

Dans le modèle ci-dessous sont indiquées les modalités associées aux différents nœuds. Ces modalités représentent les différents états possibles des variables appartenant au réseau.

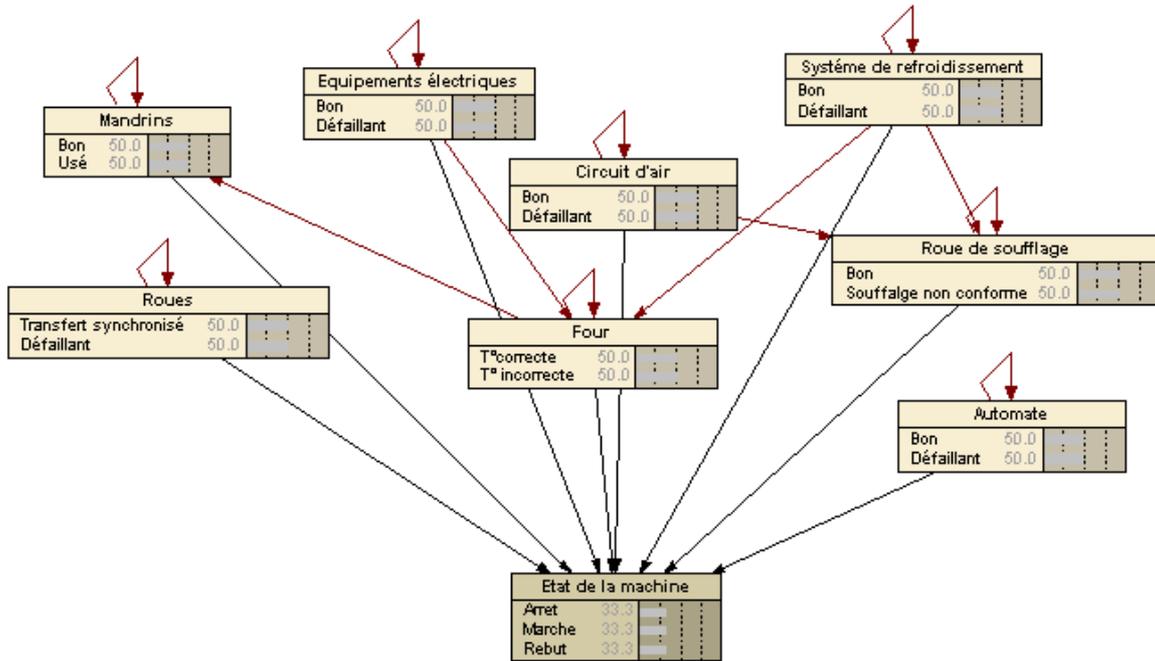


Fig. IV. 11. Modèle global obtenu avec le logiciel Netica.

Pour le comportement du réseau global, on prendra comme unité de temps ( $\Delta t$ ) égale à 1 heure. Pour contourner les obstacles de la présente version du logiciel, la simulation est réalisée en plusieurs étapes de 9 pas chacune. Les résultats de chaque étape finalisée sont considérés à leur tour comme les valeurs d'entrée pour l'étape suivante, cependant il est à remarquer que cette démarche induit une légère diminution de l'exactitude des résultats. Ces derniers sont présentés dans la figure ci-dessous.

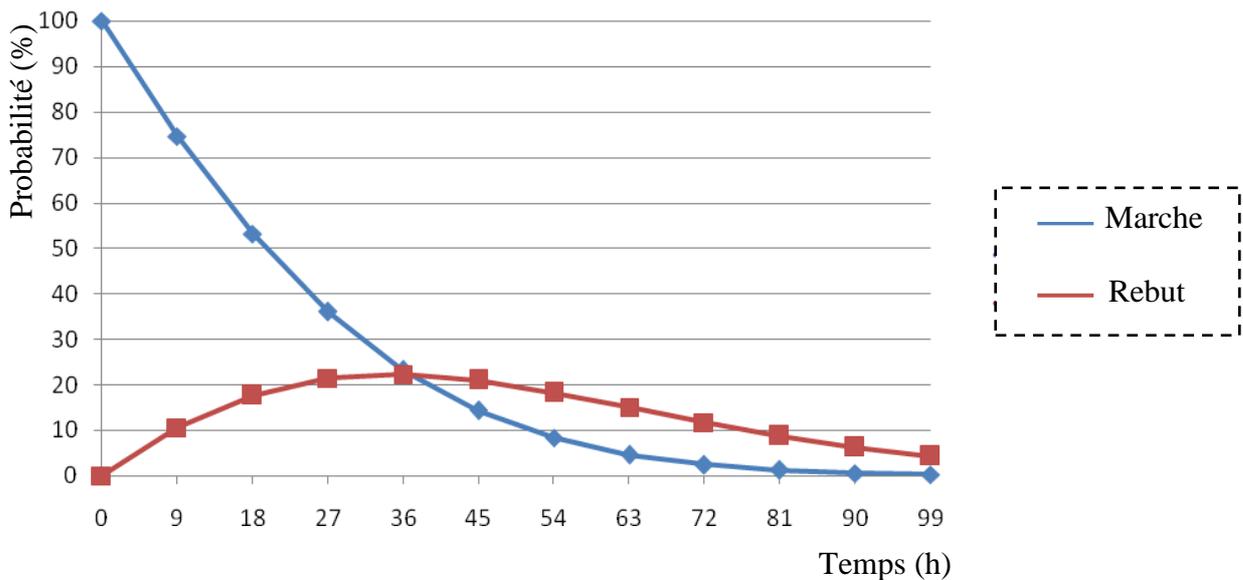


Fig.VI. 12. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement de la souffleuse et du taux de rebut.

Les résultats de cette modélisation ont abouti aux deux courbes de la figure précédente. La première courbe (tracée en bleu) montre l'évolution décroissante de la probabilité de Bon état de marche de la souffleuse. En effet, si le matériel est exploité en permanence et sans pouvoir le maintenir, il devient alors sujet à une dégradation (vieillesse) plus ou moins rapide et continue pouvant aboutir à une défaillance partielle ou totale. D'autre part, cet état du matériel, à court terme, a un effet négatif sur la qualité du produit. La deuxième courbe (tracée en marron) confirme ce constat, les rebuts croissent d'une manière significative, l'absence de maintenance en est sans aucun doute une raison principale (les différents systèmes ne fournissent plus les mêmes performances). La valeur maximale enregistrée (22%) du taux de rebut coïncide à un état du matériel situé dans une zone critique, bien en dessous de la ligne d'alerte enclenchant une intervention de la maintenance. A partir de ce point, le matériel n'a plus les capacités de remplir sa fonction requise et tout produit fabriqué ne répond plus aux normes de qualité.

#### **I. 4. Conclusion**

Cette première partie de la méthodologie, consistait en la modélisation de la dégradation du système global à partir des modèles de dégradations des composants analysés séparément. Elle a permis de répondre à l'objectif fixé au départ, en effet la simulation avec le modèle global conçu, facilite considérablement l'estimation de la fiabilité du système sur un intervalle de temps et la détermination de la probabilité de la disponibilité à tout instant  $t$ .

## **II. Modélisation du comportement du système avec intervention de la maintenance**

Dans l'étape précédente, un modèle représentant le processus de dégradation du système sans intervention de maintenance a été établi. Bien entendu, le modèle de dégradation tout seul n'est pas suffisant pour construire un système d'évaluation puisqu'il n'englobe pas les stratégies de maintenance. Le modèle de dégradation doit être complété par ces dernières. Cette étape commence par l'identification de ces stratégies.

### **II. 1. Identification des différentes stratégies**

Comme il a été indiqué dans le chapitre III (§, I), les concepts de la stratégie de maintenance pris en compte s'intéressent uniquement à la réalisation des tâches et leurs effets sur le fonctionnement de chaque composant du système.

L'impact de chaque action sur les différents phénomènes de dégradation sont précisés lors de la définition de la stratégie de maintenance considérée. Ainsi, une action peut ne pas traiter l'ensemble des mécanismes de détérioration et n'avoir d'effets que sur certains. Ces effets peuvent être différents en fonction des mécanismes considérés.

Dans le modèle proposé sont prises en compte :

- Les actions (préventives ou correctives) avec les effets possibles sur tous les mécanismes de dégradation et les modes de défaillance, selon la décision de remplacer tout ou une partie du matériel défaillant.
- Les actions de maintenance sont supposées parfaites. L'action exécutée à l'instant  $t$  sur le composant engendre automatiquement et avec certitude un effet à l'instant  $t + 1$ .

Pour les différents types d'action, leur efficacité revient à estimer le paramètre  $\rho$  comme il est montré dans le tableau suivant.

Tabl. IV. 11. L'efficacité des tâches de maintenance de remise en état.

Stratégies	Effets escomptés	Remarques
AGAN As Good As New	Retour à un niveau de dégradations nul pour les mécanismes de dégradation et à une disparition de mode de défaillance traité.	Equivaut à un remplacement par un matériel neuf, ni dégradé ni défaillant. $\rho=1$
ASGO Ageing Supervised Good Operation	Retour partiel vers un niveau inférieur d'évolution des mécanismes de dégradation.	Ni nouveau ni mauvais, avec une dégénérescence (vieillissement) programmée (surveillée) et un fonctionnement bon (as good as old) $0 < \rho < 1$
ABAO As Bad As Old	Si remise en état <u>par la maintenance corrective</u> : retour aux niveaux de dégradation ayant entraînée l'apparition du mode de défaillance. Si remise en état <u>par la maintenance préventive</u> : les mécanismes traités conservent le même niveau d'évolution.	Equivaut à un retour au même niveau de dégradation ayant précédé la remise en état, comme si aucune opération n'avait été effectuée. $\rho=0$

Par convention, il est décidé que le choix du type d'action est restreint sur sa possibilité d'être applicable à la principale cause de défaillances des composants et d'apprécier son effet sur le comportement de la machine.

Dans le tableau ci dessous, le symbole *X* indique le genre d'action qu'un composant donné est prédisposé à subir.

Tabl. IV. 12. Les types d'actions associées aux composants.

Composants	AGAN	ABAO	ASGO
<i>Four</i>	<i>X</i>		
<i>Roue de soufflage</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>
<i>Système de refroidissement</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>
<i>Circuit d'air comprimé</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>
<i>Roues</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>
<i>Mandrins</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>
<i>Automate</i>	<i>X</i>		
<i>Equipements électriques</i>	<i>X</i>		

Pour les composants four, automate et équipements électriques, les actions de types *ABAO* et *ASGO* ne sont pas applicables, vu que leurs principales défaillances sont instantanées et nécessitent un changement de matériel.

## II. 2. Intégration des stratégies

Soit  $S$  l'ensemble des états d'un composant  $X$ , et  $A$  l'ensemble des actions de maintenance. Concernant le modèle recherché, deux cas seront distingués :

- Si l'action  $A^i$  sélectionnée à l'instant  $t$  est de type *ABAO*, le système reste invariant, et évolue avec sa loi de transition naturelle.

$P(X_{t+1}^i = S^j / X_t^i = S^j, A_t = A^i)$  = la probabilité que le système passe naturellement de la configuration  $S^i$  à  $S^j$ .

- Si l'action  $A^i$  sélectionnée à l'instant  $t$  est de type *AGAN* ou *ASGO*, elle agit sur le système, ainsi le système subit une transition artificielle, contrôlé par la loi suivante :

$P(X_{t+1}^i = S^j / X_t^i = S^j, A_t = A^i)$  = la probabilité que le système passe de la configuration  $S^i$  à  $S^j$  ayant sélectionnée l'action  $A^i$ .

**La modélisation de la dégradation des composants étudiés en fonction des effets des actions de maintenance est illustrée par les exemples suivants.**

1) Le modèle ci-dessous représente l'évolution de l'état des roues au temps  $t$  à  $t+1$ , avec la prise en considération des effets des actions de maintenance préconisées.

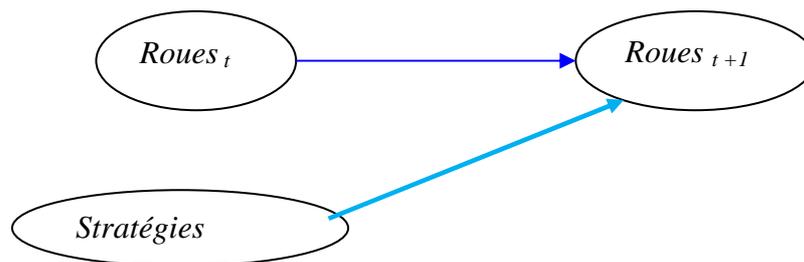


Fig. IV.13. Topologie indiquant l'évolution des roues en prenant en compte les effets des actions de maintenance qui lui sont associées.

Ainsi, la table de probabilité conditionnelle obtenue pour ce modèle est la suivante.

Tabl. IV. 13. Table de probabilité conditionnelle du nœud roues  $t+1$ .

		$P(\text{roues}_{t+1} / \text{roues}_t, \text{stratégies})$	
Stratégies <sub>t</sub>	Roues <sub>t</sub>	Bon	défaillant
<i>AGAN</i>	<i>Bon</i>	1	0
<i>ASGO</i>		1	0
<i>ABAO</i>		$1-0,0028\Delta t$	$0,0028\Delta t$
<i>aucune</i>		$1-0,0028\Delta t$	$0,0028\Delta t$
<i>AGAN</i>	<i>Défaillant</i>	1	0
<i>ASGO</i>		0,8	0,2
<i>ABAO</i>		0	1
<i>aucune</i>		0	1

Les informations contenues dans ce tableau renseignent sur l'impact des actions de maintenance selon la stratégie envisagée, ainsi :

- Si le type d'action sélectionné à l'instant  $t$  est de type *AGAN*, la probabilité de bon fonctionnement à  $t+1$  est de 1.
- Pour le type *ASGO*, on distingue deux possibilités : les roues sont en bon état de fonctionnement et la probabilité de bon fonctionnement à  $t+1$  est égale à 1, ou bien, les roues sont défectueuses et la probabilité est de  $\rho$  (dans le cas présent l'efficacité des actions de type *ASGO* est estimée à 0,8).
- Pour le type *ABAO*, les roues suivent leur dégradation naturelle avec une probabilité de défaillance de  $0,0028\Delta t$ .

La représentation du modèle avec le logiciel Netica est donnée dans la figure suivante.

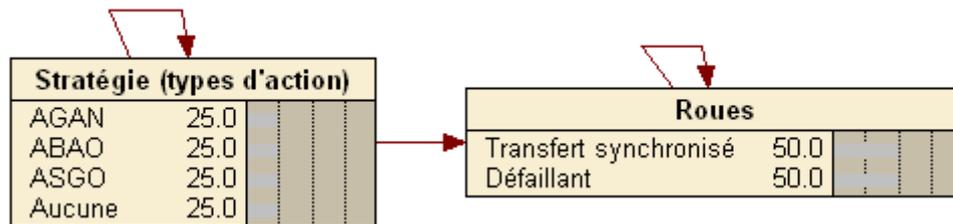


Fig. IV. 14. Présentation du modèle de la figure IV.13 avec le logiciel Netica.

Pour une unité de temps ( $\Delta t$ ) égale à 1 heure, l'évolution du comportement des roues est décrite dans la figure suivante.

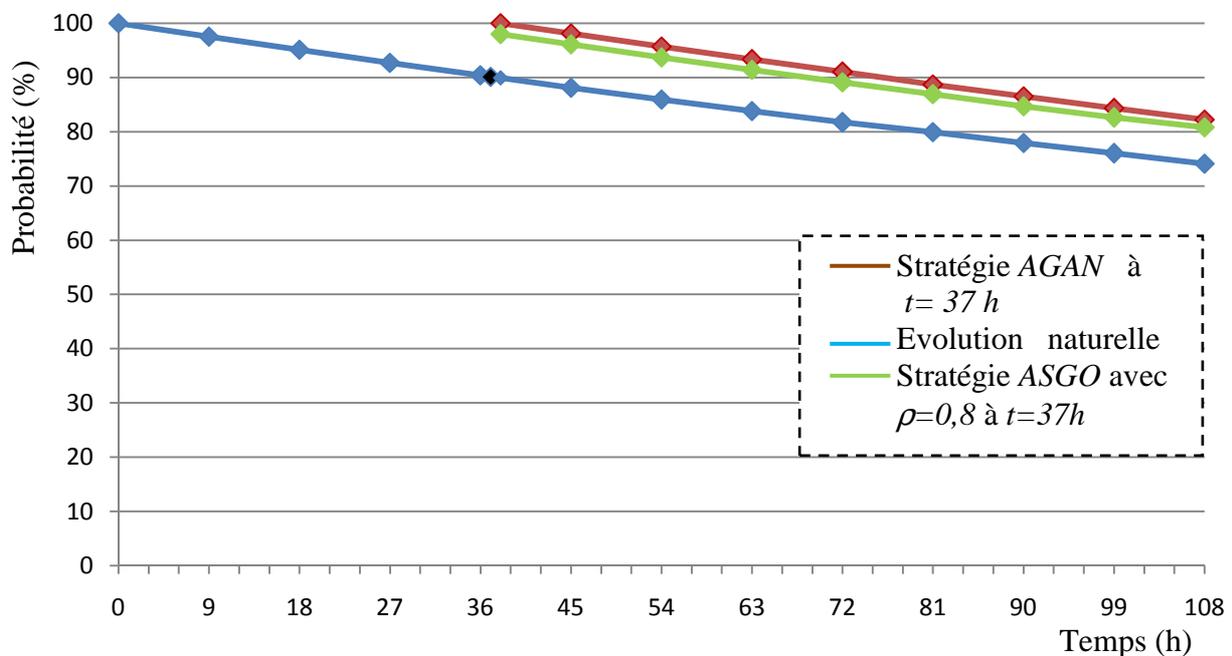


Fig. IV. 15. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon fonctionnement des roues avec et sans intervention de la maintenance.

La courbe en bleu représente la dégradation des roues sans intervention de la maintenance. Il est facile de constater que cette dégradation pour l'intervalle de temps choisi suit une évolution naturelle.

Ensuite, les deux autres courbes montrent qu'elles peuvent être les évolutions de l'état des roues selon la stratégie retenue. Or, dans ce cas précis, il se trouve que les effets des actions de maintenance des deux stratégies (AGAN et ASGO) sur les roues sont pratiquement identiques, leur efficacité apportent sans aucun doute un meilleur comportement des roues. Dans les deux cas, l'intervention de la maintenance n'aura lieu que lorsque la probabilité de bon état de fonctionnement descend à 90 % correspondant à  $t=37$  heures. Le choix définitif entre les deux stratégies dépendra par la suite en prenant en considération d'autres critères tels que les coûts de maintenance, la politique générale de la maintenance etc...

Sur la figure, la représentation des courbes (AGAN et ASGO), commence à  $t=38$  heures, en raison de leurs effets qui commence à  $t+1$  de l'instant  $t=37$  heures,

2) Le modèle ci-dessous représente l'évolution de l'état de four au temps  $t$  à  $t+1$ , avec la prise en considération des effets des actions de maintenance.

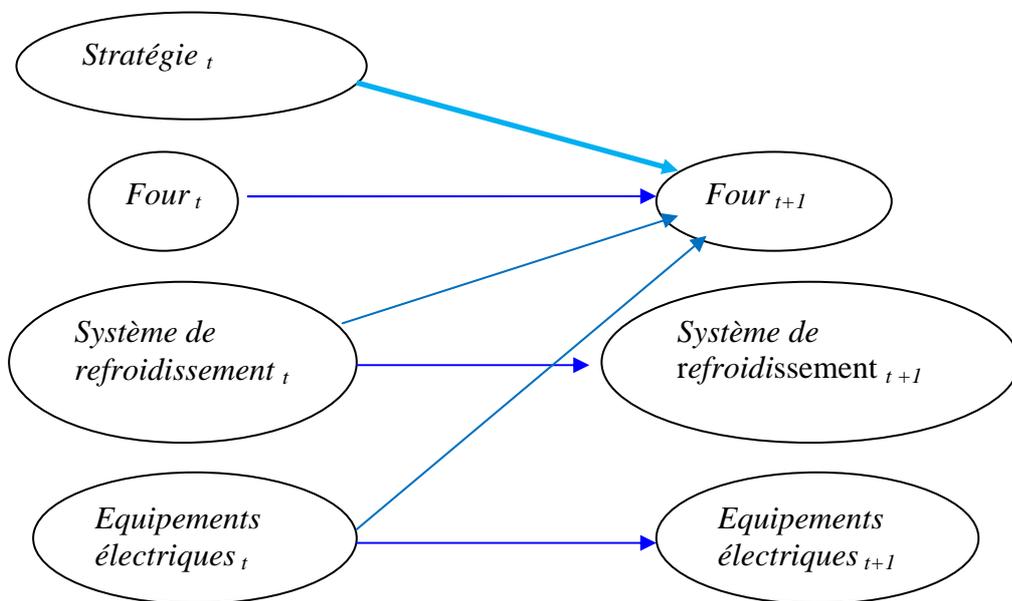


Fig. IV. 16. Topologie indiquant l'évolution de l'état du four en prenant en compte les effets des actions de maintenance qui lui sont associées.

La représentation du modèle avec le logiciel Netica est donnée dans la figure suivante.

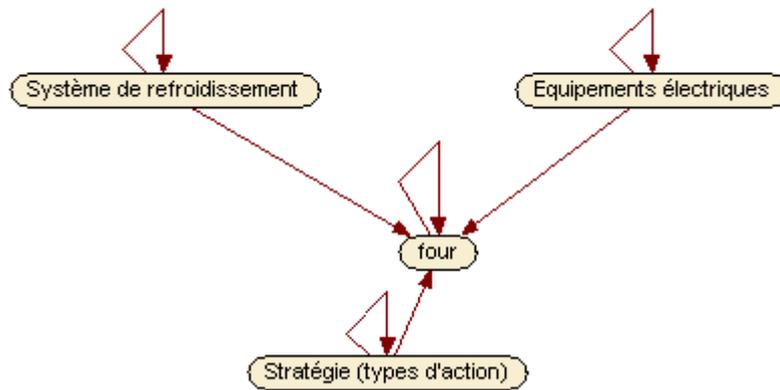


Fig. IV. 17. Présentation du modèle de la figure IV.16 avec le logiciel Netica.

Comme il a été spécifié précédemment, pour le composant four, les actions de types *ABAO* et *ASGO* ne sont pas applicables, vu que ses principales défaillances sont instantanées et nécessitent un changement de matériel.

Dans cette présentation, seuls les arcs diachroniques figurent. Ils représentent l'évolution des composants et leurs dépendances. La prise en considération des stratégies de maintenance sur le composant four est illustrée par le nœud stratégie (types d'action).

La table des probabilités conditionnelles est donnée dans le tableau ci-dessous.

Tabl. IV. 14. Table de probabilité conditionnelle associée au nœud  $four_{t+1}$ .

Stratégie $t$	Equipements électriques $t$	Système de refroidissement $t$	Four $t$	$P (Four_{t+1}/Four_t, \text{Système de refroidissement}_t, \text{Equipements électriques}_t, \text{Stratégie}_t)$	
				Bon	Défaillant
AGAN	Bon	Bon	Bon	1	0
			Défaillant	1	0
		Défaillant	Bon	1	0
			Défaillant	1	0
	Défaillant	Bon	Bon	1	0
			Défaillant	1	0
		Défaillant	Bon	1	0
			Défaillant	1	0
Aucune	Bon	Bon	Bon	$1-0,01442\Delta t$	$0,01442\Delta t$
			Défaillant	0	1
		Défaillant	Bon	0	1
			Défaillant	0	1
	Défaillant	Bon	Bon	0	1
			Défaillant	0	1
		Défaillant	Bon	0	1
			Défaillant	0	1

Les informations contenues dans ce tableau renseignent sur l'impact des actions de maintenance selon la stratégie envisagée, ainsi :

- Si le type d'action sélectionné à l'instant  $t$  est de type *AGAN*, la probabilité de bon fonctionnement à  $t+1$  est de  $1$ .
- Si aucune action n'a été sélectionnée, le four suit sa dégradation naturelle avec la probabilité de défaillance de  $0,01442\Delta t$ . La probabilité de défaillance sera égale à  $1$ , si l'un ou les deux systèmes sont défaillants. Effectivement, s'il y a une mauvaise alimentation des lampes infrarouges et/ou un refroidissement insuffisant des panneaux au niveau du four, la température sera incorrecte.

### **II. 3. Réseau global**

Dans le réseau global sont intégrés les différents sous modèles de dégradation en mettant en évidence l'ensemble des composants concernés et leur stratégie de maintenance adoptée. Ci-dessous dans la représentation de réseau sous Netica, sont indiquées les variables des composants et sous systèmes, les stratégies de maintenance et l'état de la machine. Les arcs synchroniques sont désignés en noir, tandis que les arcs diachroniques sont désignés en rouge.

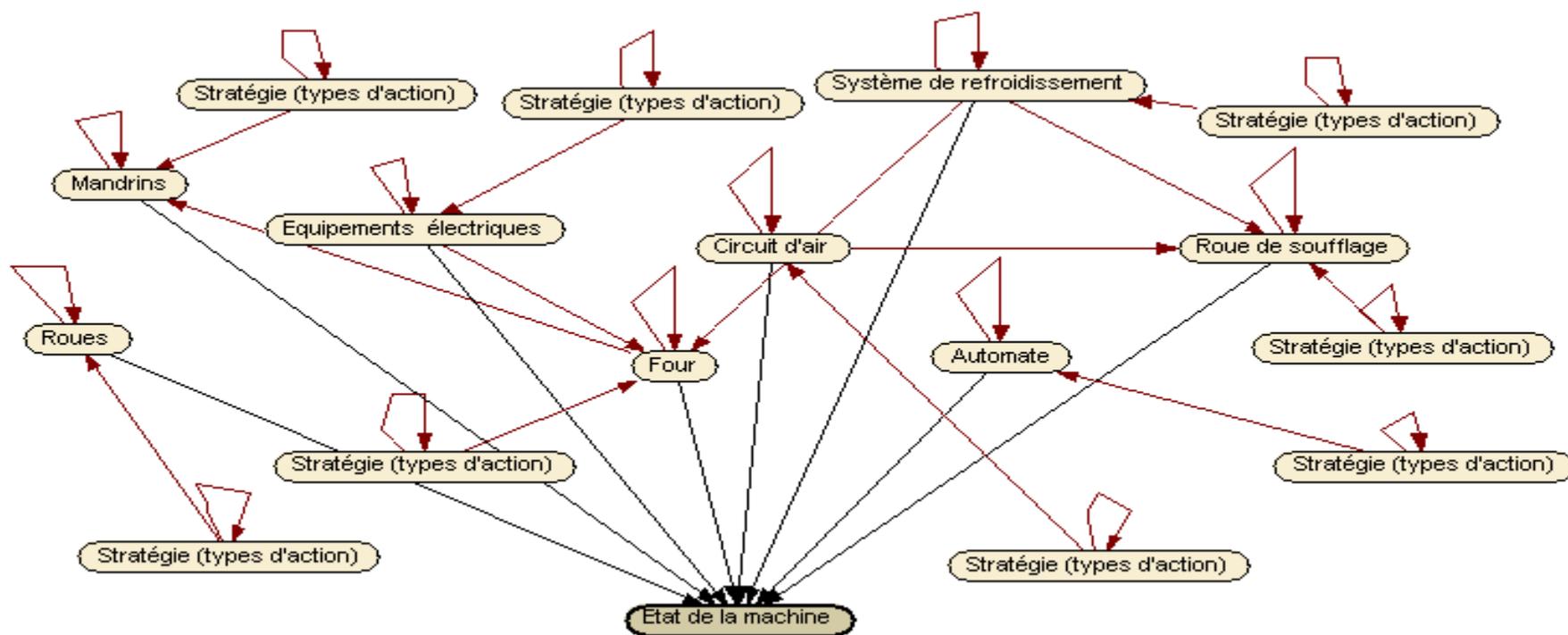


Fig. IV. 18. Topologie représentant le modèle global sous Netica.

Dans le modèle ci-après, sont définies les modalités des différents nœuds. Ils indiquent les différents états possibles que les variables du réseau peuvent comporter. Les distinctions concernent : pour les composants, les sous systèmes et la machine, les modalités renseignent sur leurs états de fonctionnement ; par contre pour les stratégies de maintenance, les modalités renseignent sur les différents genres d'actions que les composants ou les sous systèmes sont prédisposés à subir.

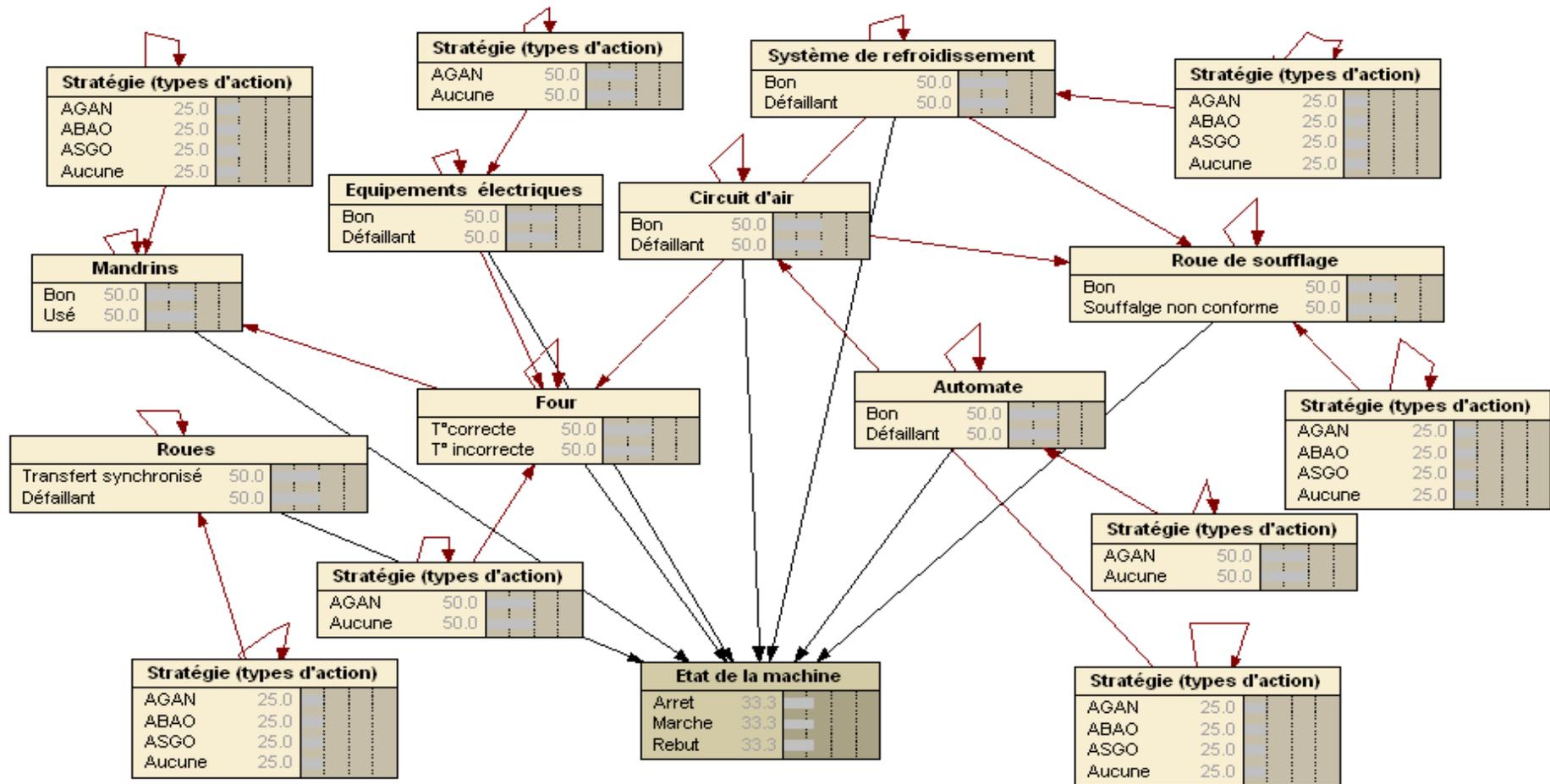


Fig. IV. 19. Topologie représentant le modèle global avec les modalités des nœuds.

L'unité de temps ( $\Delta t$ ) considérée est égale à 1 heure. Afin d'exploiter les résultats du réseau, et de montrer l'intérêt de la démarche il est proposé un exemple pour l'évaluation des paramètres de sûreté avec intervention de la maintenance.

Dans cet exemple sera déterminée la probabilité de marche de la souffleuse, en appliquant, la maintenance *AGAN* sur la roue de soufflage et le four à partir de l'instant  $t=45$  heures.

L'allure de la courbe obtenue est présentée ci-dessous.

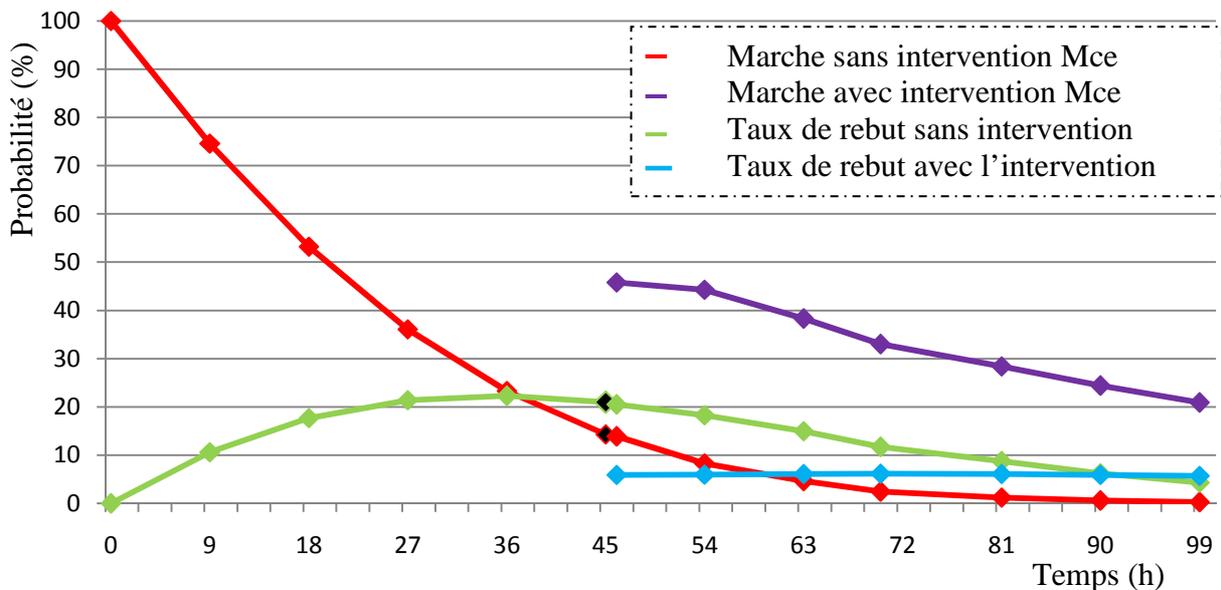


Fig. IV. 20. L'évolution de la probabilité en dynamique de bon marche de la souffleuse, selon la stratégie appliquée.

Sans intervention de la maintenance sur le four et la roue de soufflage, la souffleuse subira une dégradation sensible et persistante pouvant aboutir à une défaillance totale. Les raisons sont multiples, mais inexorablement, le comportement de ces deux composants de la machine est fortement influé par l'état du système de refroidissement, des équipements électriques et du circuit d'air comprimé. Si ces éléments, dont leur criticité est élevée, ne sont pas maintenus la gravité de la dégradation de la souffleuse ne peut être autrement. D'ailleurs, la nature et le niveau de rebut croissant confirment facilement ce constat (courbes tracées en couleurs rouge et vert).

Par contre en appliquant les actions de maintenance appropriées sur les éléments en question, la situation de l'état de la souffleuse est meilleure, avec une dégradation retardée et mieux maîtrisée. Le rebut est quant à lui largement réduit (courbes tracées en couleurs violet et bleu).

## II. 4. Conclusion

Dans cette deuxième partie de la méthodologie, sont présentés les modèles de dégradation des différents composants et sous systèmes pris séparément, pour ensuite les associer et les intégrer dans un modèle global en tenant compte cette fois ci des différentes stratégies de maintenance.

A travers les exemples traités, il a été possible d'illustrer l'intérêt de l'approche et son utilisation dans le cadre de la démarche d'évaluation prévisionnelles des paramètres de sûreté d'un système dans une phase d'exploitation avec les effets des stratégies de maintenance.

## III. Possibilités d'exploitation du réseau

Précédemment dans le chapitre III. § (I. 3) il a été fait mention sur les différentes façons d'exploiter un réseau bayésien sans la moindre modification, ni sur la structure du réseau ni sur les tables de probabilités conditionnelles. Pour démontrer cette propriété, il est proposé de le faire par un exemple de diagnostic, de prédiction et un autre avec un raisonnement mixte.

### III. 1. Diagnostic

La possibilité d'utiliser le réseau pour établir un diagnostic, consiste à procéder de la façon suivante : s'il est envisagé par exemple à  $t=1h$  et à  $t=9h$  de modifier l'état de la variable de sortie, état de la machine, telle que la modalité rebut est égale à 100%. Le réseau par l'introduction de cette donnée, change automatiquement les variables d'entrées des instants  $t=1h$  et  $t=9h$  respectivement.

Les modèles conçus et indiqués dans les figures IV. 21 et IV. 22 permettent, après modification de la variable de sortie relative à l'état de la machine, d'obtenir les résultats suivants (Tabl. IV. 15).

Tabl. IV. 15. Probabilités des variables (diagnostic).

Variables modifiées		Variables	$t=1h$	$t=9h$
Etat de la machine	Arrêt= 0 Marche = 0 <b>Rebut =100%</b>	Automate	Bon =100%	Bon=100
		Equipements électriques	Bon =100%	Bon=100
		Four	Bon=15.1%	Bon=1.83%
		Roue de soufflage	Bon=100%	Bon=100%
		Système de refroidissement	Bon=94.1%	Bon=99.2%
		Circuit d'air	Bon=90.6%	Bon=98.7%
		Mandrins	Bon=100%	Bon=100%
		roues	Bon=100%	Bon=100%

Du tableau ci-dessus, il est possible de constater que l'élément qui a de forte chance d'être la cause du rebut est le four, avec une probabilité de défaillance égale à 85% à  $t=1h$  et de 98% à  $t=9h$ .

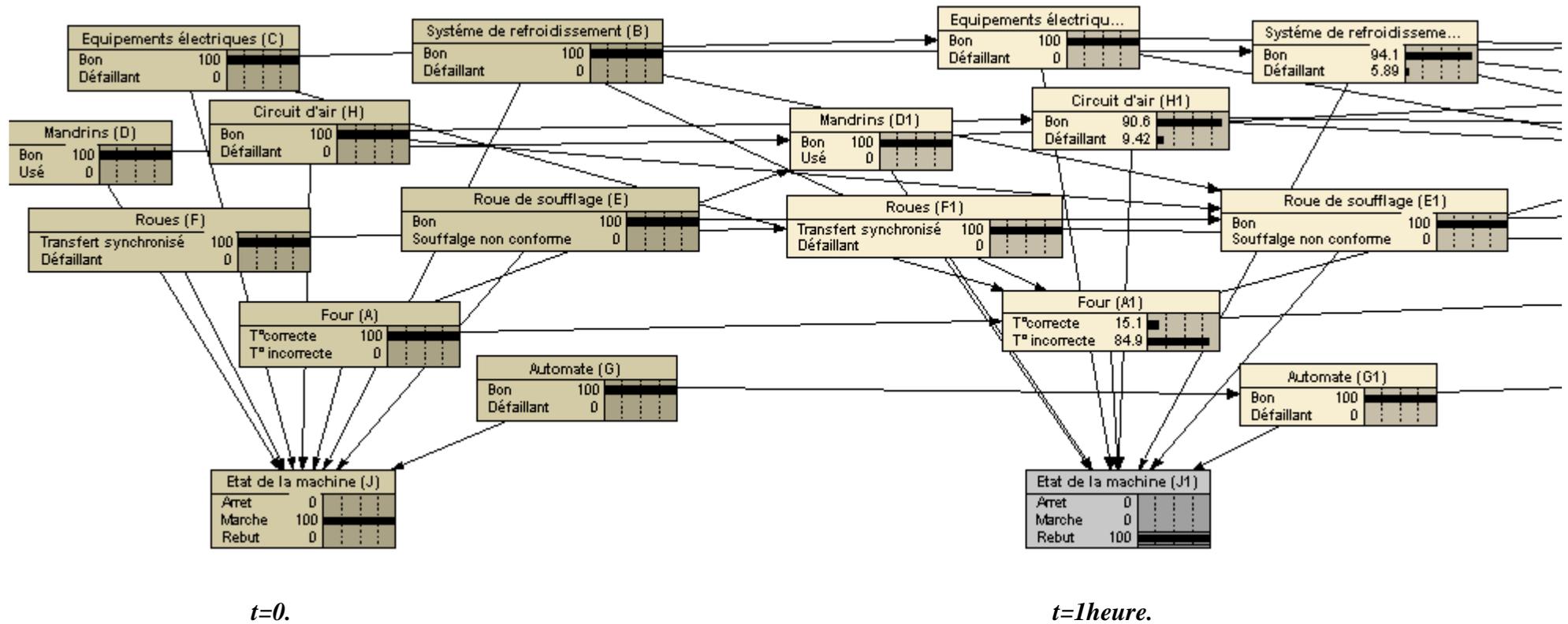


Fig. IV. 21. Exemple de diagnostic à t=1heure.

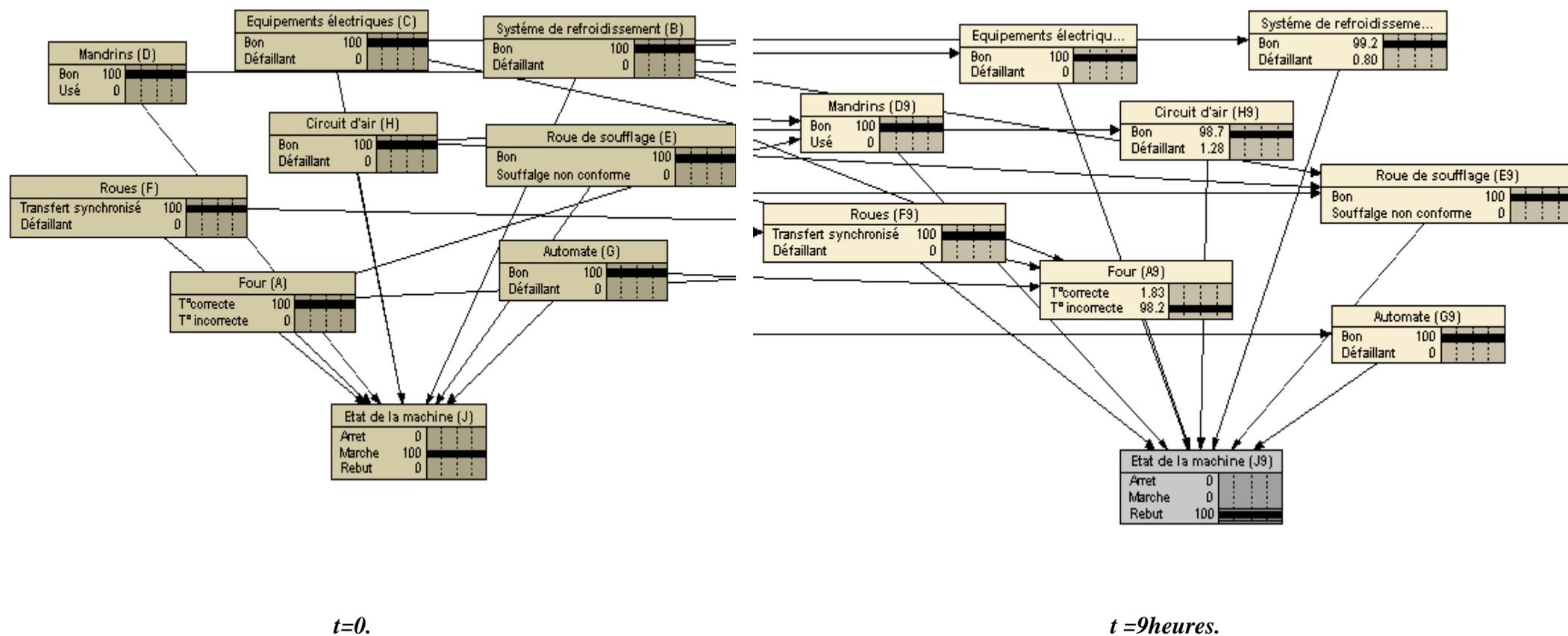


Fig. IV. 22. Exemple de diagnostic à  $t=9$ heure.

### III. 2. Prédiction

En ce qui concerne la possibilité d'utiliser le réseau pour établir une prédiction, il suffit d'introduire différentes valeurs dans les nœuds d'entrées selon la probabilité que les composants et sous systèmes soient en bon état de fonctionnement. Les données introduites de la sorte automatiquement modifient l'appréciation des nœuds de sortie à  $t$ , et à  $t+n$ .

Les modèles conçus et indiqués dans les figures IV. 23 et IV. 24 permettent, après l'introduction des différentes données relatives aux nœuds concernés, d'obtenir les résultats suivants (Tabl. IV. 16 et IV. 17).

La colonne du tableau en blanc comporte les probabilités renseignées. Tandis que les colonnes grisées comportent les probabilités obtenues par simulation : le gris foncé concerne la prédiction à l'instant  $t = 0h$ , et le gris clair concerne la prédiction à  $t+n$ .

Tabl. IV. 16. Probabilités des variables (prédiction).

Variables			$t=1$	$t=2$	$t=3$
Automate	Bon=99.5%		99.3%	99.1%	98.9%
Equipements électriques	Bon=98%		97.8%	97.6%	97.4%
Four	Bon=98%		92.8%	91.2%	89.6%
Roues de soufflage	Bon=98%		94%	93.6%	93.3%
Système de refroidissement	Bon=98%		97.9%	97.8%	97.7%
Circuit d'air	Bon=98%		97.8%	97.7%	97.5%
Mandrins	Bon=90%		89.3%	88.7%	88%
Roues	Bon=90%		89.7%	89.5%	89.2%
Etat de la machine	Marche	72.9%	70.5%	68.3%	66.1%
	Rebut	4.55%	2.68%	3.63%	4.53%

Le même exemple mais cette fois-ci en intégrant à  $t=0h$ , une stratégie de maintenance ASGO pour les éléments prédisposés.

Tabl. IV. 17. Probabilités des variables (prédiction avec stratégie).

Variables d'entrées		Modalité	$t=1$	$t=2$	$t=3$
Automate	Bon=99.5%		99.3%	99.1%	98.9%
Equipements électriques	Bon=98%		97.8%	97.6%	97.4%
Four	Bon=98%		92.8%	91.3%	89.7%
Roue de soufflage	Bon=98%		99.6%	96.7%	96.3%
Système de refroidissement	Bon=98%		99.6%	99.5%	99.4%
Circuit d'air	Bon=98%		99.6%	99.4%	99.3%
Mandrins	Bon=90%		96%	97.3%	96.5%
Roues	Bon=90%		96%	97.7%	97.5%
Etat de la machine	Marche	72.9%	87.6%	84.8%	82.1%
	Rebut	4.55%	5.32%	5.97%	7.06%

Les résultats de ces simulations présentent des résultats convaincants sur la nécessité de pratiquer une maintenance. L'amélioration de l'état de la machine est perceptible à travers l'évolution positive des probabilités de bon état de fonctionnement qui sont des indications quantifiées et précises.

D'autre part, il est très facile de procéder de la même manière en imaginant différents scénarii de maintenance, de comparaître les résultats et enfin de choisir la stratégie de maintenance la plus optimale.

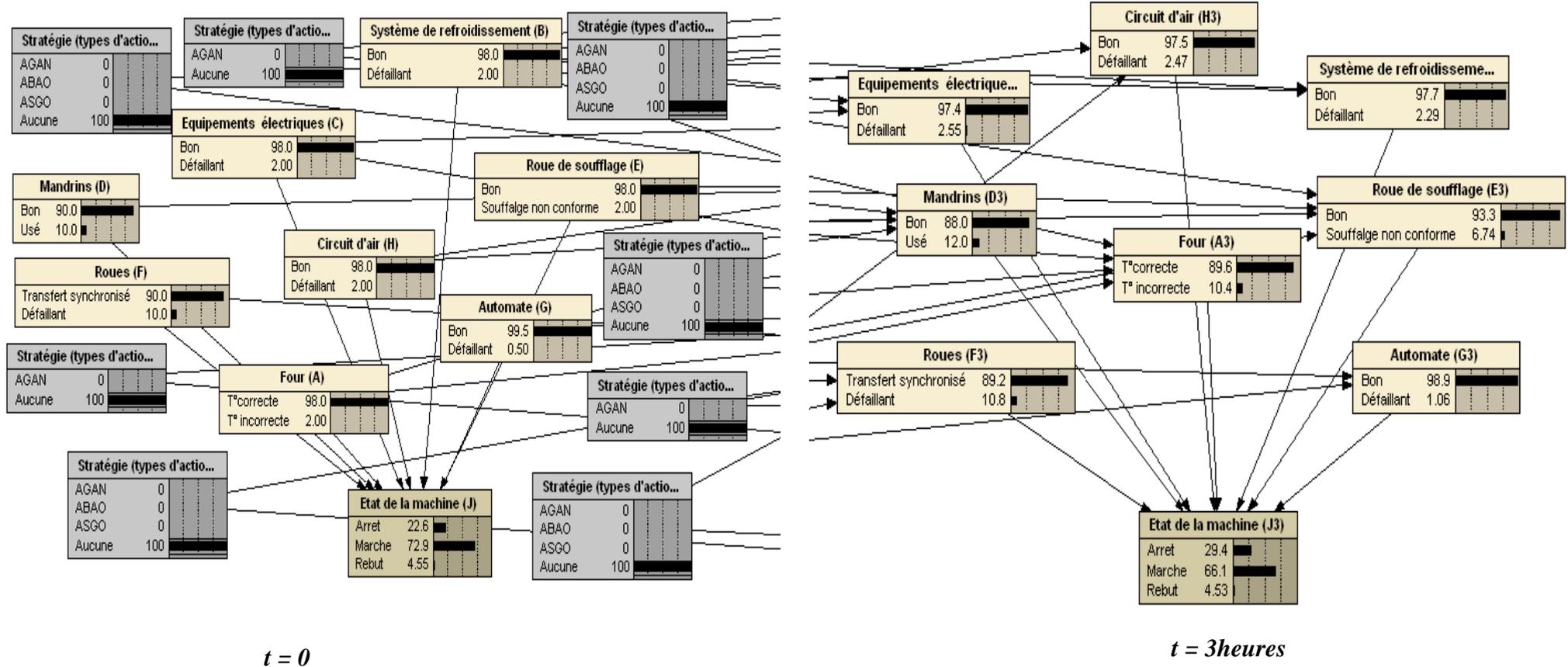


Fig. IV. 23. Exemple de prédiction sans intervention de la maintenance.

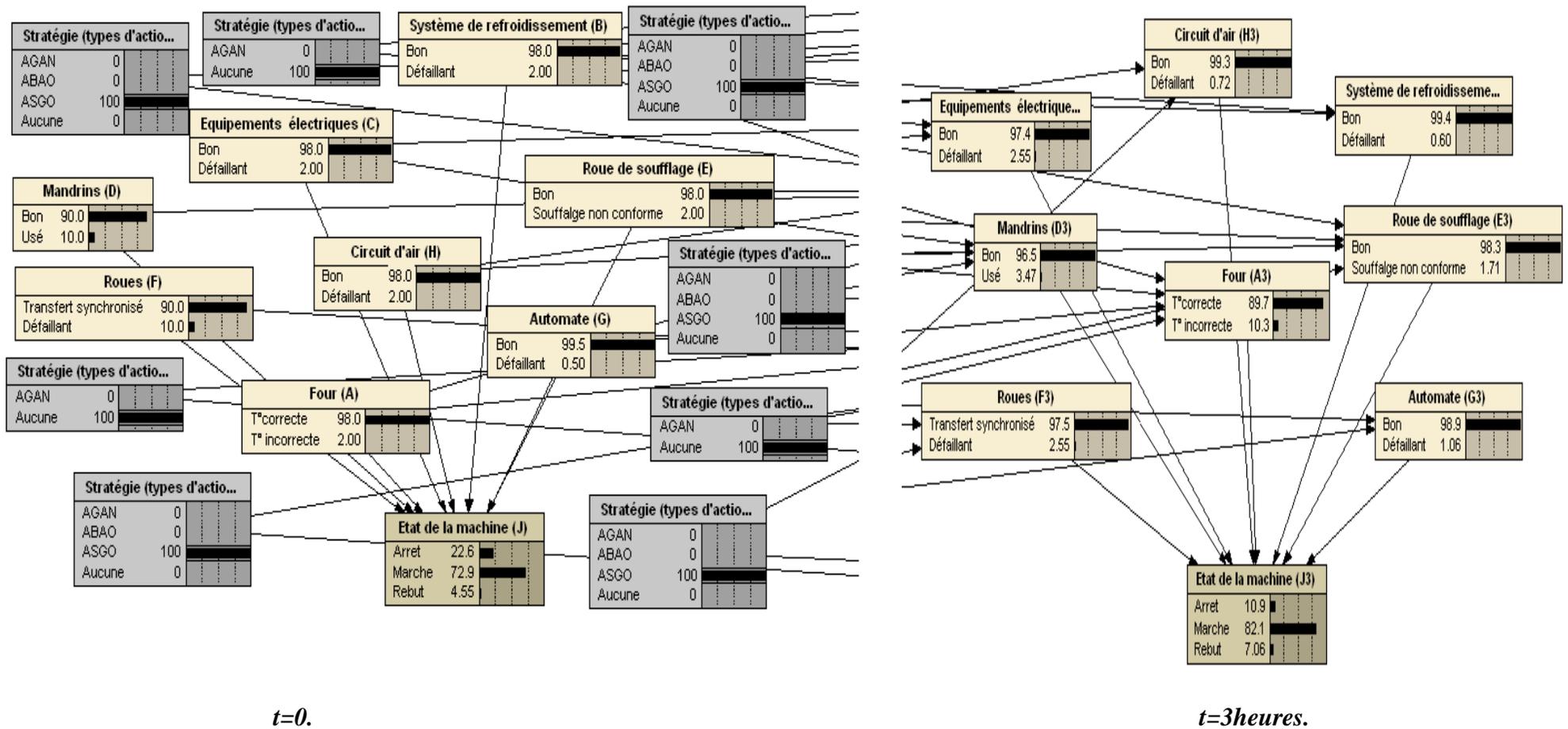


Fig. IV. 24. Exemple de prédiction avec une stratégie de maintenance.

### III. 3. Raisonnement mixte

La troisième possibilité est encore plus large. Cette fois ci, il est possible également d'introduire une observation sur le nœud de sortie, et une ou plusieurs autres sur les nœuds d'entrées à l'instant  $t=1h$  puis à  $t=9h$ . Les changements automatiques effectués sur les autres nœuds sont très significatifs.

Dans cet exemple, la machine est supposée à l'arrêt, les mandrins et les roues sont en bon état d'accomplir leurs fonctions. Ces simulations favorisent grandement les prises de décision par l'apport d'indications supplémentaires et plus précises sur l'état des autres composants (nœuds).

*Tabl. IV. 18. Probabilités des variables (raisonnement mixte).*

Variables modifiées		Variables influencées	$t=1$	$t=9$
Etat de la machine	Arrêt =100%	Automate	62.9%	73.9%
		Equipements électriques	62.9%	73.9%
Mandrin	Bon =100%	Four	98.6%	56.7%
		Roue de soufflage	74%	50%
Roue	Bon=100%	Système de refroidissement	99.9%	87.5%
		Circuit d'air	99.8%	80.1%

Le modèle présenté dans la *Fig. IV. 25*, permet des simulations dont les résultats sont renseignés dans le *Tabl. IV. 18*, en procédant à la modification de la variable de sortie relative à l'état de la machine et des deux variables d'entrées choisies sur les mandrins et les roues.

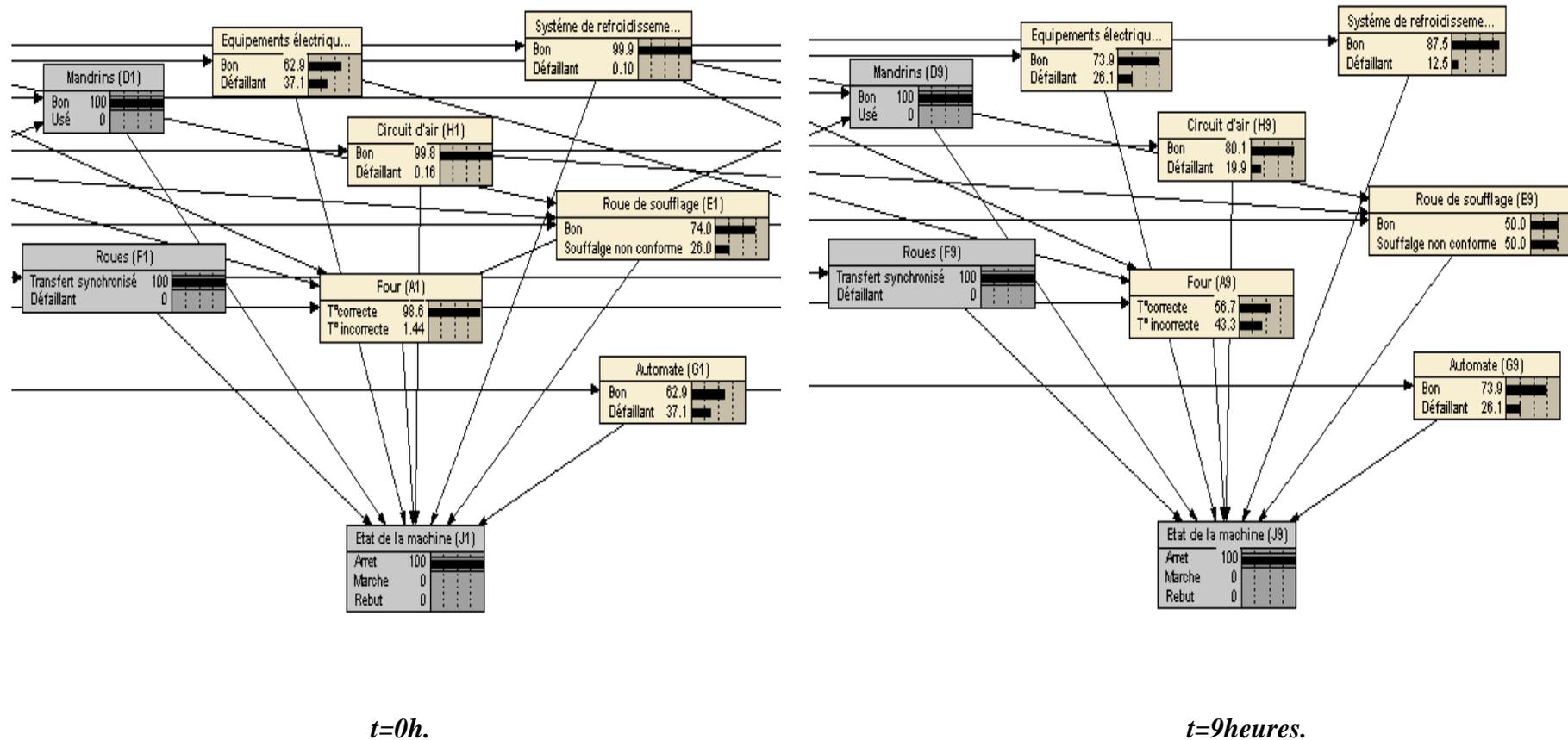


Fig. IV. 25. Exemple de raisonnement mixte.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, à travers une application, l'utilisation des réseaux bayésiens dynamiques pour l'évaluation prévisionnelle de la sûreté de fonctionnement d'un système industriel. Nous nous sommes tout d'abord intéressés à la modélisation de la dégradation du système sans intervention de la maintenance, puis dans la seconde partie, les différentes stratégies de maintenances ont été intégrées au modèle.

En final nous avons présenté différents exemples d'exploitation du modèle global. Les contraintes imposées en termes d'objectifs de performance, rendent l'utilisation de ce type de modèle plus qu'indispensable. Effectivement sa flexibilité, sa facilité d'utilisation et d'aide à la décision apportée par ce modèle, constituent un outil efficace et précieux. Il faut cependant faire attention à l'interprétation des valeurs données par le réseau bayésien, car cet outil ne donne pas de valeurs exactes, mais plutôt des estimations.

---

## **Conclusion Générale et Perspectives**

L'objectif des travaux présentés dans ce mémoire a consisté précisément en la présentation d'une démarche de modélisation des systèmes maintenus pour l'évaluation prévisionnelle de la sûreté de fonctionnement en prenant en compte la dynamique de choix de la stratégie de maintenance. Alors que ces dernières décennies ont vu apparaître de nouvelles méthodes théoriques et outils d'analyse de sûreté de fonctionnement, il apparaît que le formalisme des Réseaux bayésiens, formalisme intuitif aux capacités de modélisation étendues, avec son extension dynamique est bien adapté pour représenter des systèmes complexes évoluant au cours du temps.

Dans un premier temps, nous avons montré à travers une présentation de l'état de l'art des outils et méthodes de la sûreté de fonctionnement, que les approches basées sur la simulation sont les plus adaptées. Notre choix s'est porté sur le formalisme des réseaux bayésiens qui a fait l'objet d'une présentation détaillée. Suite à cela, nous avons décrit la démarche de modélisation permettant de présenter le modèle de dégradation d'un système ainsi que l'intégration des effets d'une stratégie de maintenance considérée sur ce dernier et nous avons terminé par une application.

La mise en œuvre de la démarche se décline en deux phases

- Une première phase qui consiste en la modélisation de la dégradation du système à partir des processus de dégradation de ses composants. Profitant de leur flexibilité, l'utilisation des réseaux bayésiens dynamiques pour la modélisation des processus de dégradation a permis de modéliser concrètement les dépendances fonctionnelles entre les composants de façon très simple.
- La deuxième phase consiste à compléter la modélisation par l'ensemble de stratégies ou actions de maintenance.

Les résultats obtenus étaient satisfaisants, ils nous permettent de conclure que l'utilisation de formalisme des réseaux bayésiens dynamiques (*RBD*) pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes maintenus est une approche pertinente. De plus, la possibilité d'exploiter le modèle dans le domaine de diagnostic, d'anticipation ou la prédiction le rend plus qu'indispensable.

Aussi un des intérêts essentiels est que le modèle peut servir à planifier les actions de maintenance en donnant les instants et les natures de l'intervention de façon anticipée selon les contraintes en termes d'objectifs de performance, en d'autres termes, déterminer de façon simultanée la nature de l'action ainsi que son moment d'exécution. Dans ce cas, les stratégies de maintenance seront donc formées par un ensemble de couples (temps, action), ce qu'est d'un grand apport pour les managers de maintenance.

De point de vue conception de modèle, un des intérêts est d'avoir utilisé et regrouper les données provenant de plusieurs sources (avis d'expert, historique), concernant sa mise en œuvre, le réseau a été conçu d'une manière simple. Par conséquent nous ne pouvons que conseiller son utilisation dans des cas d'études des systèmes industriels complexe.

Dans le cas où le nombre d'éléments constituant le réseau est important, ce qui le rend illisible et difficile à exploiter, l'utilisation de l'extension réseau bayésien dynamique orienté objet (*RBDOO*) qui limite la complexité de modèle est à recommander.

La démarche que nous avons présentée traite uniquement les effets des stratégies de maintenance au niveau efficacité, la compléter par la prise en considération de l'aspect économique sera très intéressant.

Il est très important aussi de s'intéresser dans le cadre des problèmes d'apprentissage, aux traitements des données de Retour d'Expérience, dans le but d'estimer les paramètres de dégradation des composants de système considéré.

---

# Références bibliographiques

[Arroyo et al, 1998] G. ARROYO, L.E. SUCAR, A. VILLAVICENCIO «Probabilistic temporal reasoning and its application to fossil power plant operation». *Expert Systems with Applications* 15, 317–324.

[Bellot, 2002] D. BELLOT. Thèse de doctorat « Fusion de données avec des réseaux bayesiens pour la modélisation des systèmes dynamique et son application en télémédecine». Université Henri Poincaré – Nancy 1, 2002.

[Ben Salem, 2008] A. BEN SALEM. Thèse de doctorat «Modèles Probabilistes de Séquences Temporelles et Fusion de Décisions. Application à la Classification de Défauts de Rails et a leur Maintenance». Université Henri Poincaré -Nancy 1, 2008.

[Borgia et al. 2009] O. BORGIA, F. DE CARLO, M. PECCIANI, M. TUCCI «The Use of Dynamic Object Oriented Bayesian Networks in Reliability Assessment: a Case Study». *Recent Advances in Maintenance and Infrastructure Management*. Springer-Verlag London Limited, London, England.

[Bouillaut et al, 2008] L. BUOULLAUT, R. DONAT, P. AKNIN, P. LERAY «Approches markovienne et semi-markovienne pour la modélisation de la fiabilité et des actions de maintenance d'un système ferroviaire». 2008.

[Bouissau et al, 1999] M. BOUISSOU, F. MARTIN, A. OURGHANLIAN «Assessment of a safety critical system including software: a Bayesian belief network for evidence sources» In: *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS'99)*. Washington, Janvier. 1999.

[Boumendil, 2010] M. BOUMENDIL. Thèse de magister «Contribution à l'application de l'approche Bayésiennes dans l'analyse pathologique des systèmes mécaniques ». Université M'hamed Bougara, Boumerdes, 2010.

[Bouzaine-Marle, 2005] L. BOUZAINE-MARLE. Thèse de doctorat «AVISE, Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts. Application à un matériel passif d'une centrale nucléaire : le pressuriseur». Ecole Centrale Paris, 2005.

[Cain, 2004] J. CAIN «Planning improvements in natural resources management guidelines for using Bayesian networks to support the planning and management of development programmes in the water sector and beyond». Centre for Ecology and Hydrology, UK, 2004.

[Castillo et al, 1997] E. CASTILLO, C. SOLARES, P. GOMEZ «Tail uncertainty analysis in complex systems». *Artificial Intelligence*. 96 (1997), 395-419.

[Celeux et al, 2006] G. CELEUX, F. CORSET, A. LANNOY, B. RICARD «Designing a Bayesian network for preventive maintenance from expert opinions in a rapid and reliable way». *Reliability Engineering and System Safety* 91 (2006) 849–856.

[Corset, 2003] F. CORSET. Thèse de doctorat « Aide à l'optimisation de maintenance à partir de réseaux bayésiens et fiabilité dans un contexte doublement censuré ». Université Joseph Fourier, 2003.

[Demri, 2009] A. DEMRI. Thèse de doctorat « Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle ». Université d'Angers, 2009.

[Donat, 2009] R. DONAT. Thèse de doctorat « Modélisation de la fiabilité et de la maintenance par modèles graphiques probabilistes .Application à la prévention des ruptures de rails ». Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, 2009.

[Doyen et Gaudoin, 2004] L. DOYEN, O. GAUDOIN. Rapport du contrat T50L47/F00555/0 entre EDF et le LMC « Modélisation de l'efficacité de la maintenance des systèmes réparables - Synthèse bibliographique ». Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004.

[François et al, 2008] O. FRANÇOIS, L. BUOULLAUT, P. AKNIN « Approche semi-markovienne pour la modélisation de stratégie de maintenance : application à la prévention de rupture du rail. 7ème conférence Francophone de Modélisation et Simulation-MOSIM'08-Paris, France, 2008.

[François, 2006] O. FRANÇOIS. Thèse de doctorat « De l'identification de structure de réseaux bayésiens à la reconnaissance de formes à partir d'informations complètes ou incomplètes ». Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, 2006.

[Ghostine, 2008] R. GHOSTINE. Thèse de doctorat « Influence des fautes transitoires sur la fiabilité d'un système commandé en réseau ». Institut National Polytechnique de Lorraine, 2008.

[Godichaud, 2009] M. GODICHAUD. Thèse de doctorat « Outils d'aide à la décision pour la sélection des filières de valorisation des produits de la déconstruction des systèmes en fin de vie : application au domaine aéronautique ». Université de Toulouse, 2009.

[Infante, 2006] G. INFANTE. Thèse de doctorat « Apprentissage de modèles de comportements pour le contrôle d'exécution et la planification robotique ». Université de Toulouse, 2006.

[Kang et Golay, 1999] C.W. KANG, M.W. GOLAY « A Bayesian belief network-based advisory system for operational availability focused diagnosis of complex nuclear power systems ». Expert Systems with Applications 17, 21–32, 1999.

[Khelfaoui, 2003] S. KHELFAOUI. Thèse de doctorat « Méthode de recherche des scénarios redoutés pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde automobile ». Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.

[Langseth et al, 2009] H. LANGSETH, T.D. NIELSEN, R. RUMÍ, A. SALMERÓN « Inference in hybrid Bayesian networks ». Reliability Engineering and System Safety 94, 1499–1509, 2009.

[Laprie et al 04] J.C. LAPRIE «Sûreté de fonctionnement des systèmes : concepts de base et terminologie », Rapport LAAS N°04520. Revues Scientifiques, Revue de l'Electricité et de l'Electronique, N°11, pp.95-105, Décembre 2004.

[Leray, 2006] P. LERAY. Habilitation à Diriger les Recherches «Réseaux bayésiens: apprentissage et modélisation de systèmes complexes ». Université de Rouen, 2006.

[lung et al, 2005] B. LUNG, M. VERON , M.C. SUHNER, A. MULLER «Integration of Maintenance Strategies into Prognosis Process to Decision-Making Aid on System Operation» CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 54, Issue 1, 2005, Pages 5-8.

[Medina Oliva et al, 2009] G. MEDINA OLIVA, P. WEBER, C. SIMON, B. IUNG «Bayesian networks Applications on Dependability, Risk Analysis and Maintenance» Author manuscript, published in 2nd IFAC Workshop on Dependable Control of Discrete System, DCDS'09, Bari: Italy, 2009.

[Medjoudj, 2006] M. MEDJOUDJ. Thèse de doctorat «Contribution à l'analyse des systèmes pilotés par calculateurs : Extraction de scénarios redoutés et vérification de contraintes temporelles» Université Paul Sabatier de Toulouse, 2006.

[Mengshoel et al 2008] O.J. MENGSHOEL, A. DARWICHE, S. UCKUN «Sensor validation using Bayesian networks» In: Proceedings of the Ninth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space (iSAIRAS- 08), Los Angeles, CA (2008).

[Mkhida, 2008] A. MKHIDA. Thèse de doctorat «Contribution à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des Systèmes Instrumentés de Sécurité intégrant de l'Intelligence».Université de Nancy, 2008.

[Montani et al 2006] S. MONTANI, L. PORTINALE, A. BOBBIO, M. VAREGIO, D. CODETTA-RAITERI «A tool for automatically translating Dynamic Fault Trees into Dynamic Bayesian Networks». Reliability and Maintainability Symposium (RAMS 2006), pp. 434–441.

[Muller et al, 2008] A. MULLER, M.C .SUHNER, B. IUNG «Formalisation of a new prognosis model for supporting proactive maintenance implementation on industrial system». Reliability Engineering and System Safety 93 (2008) 234–253. 2008.

[Murphy, 2002] K. P. MURPHY. Doctor of Philosophy in Computer Science « Dynamic Bayesian Networks: Representation, Inference and Learning» University OF California, Berkeley, 2002.

[Murphy, 2010] K. P. MURPHY «Software Packages for Graphical Models/Bayesian Networks ». <http://people.cs.ubc.ca/~murphyk/Software/bnsoft.html>.

[Naim et al, 2007] P. NAIM. P.H. WUILLEMIN, P. LERAY, O. POURRET, A.BECKER «Réseaux bayésien ». Edition EYROLLES, 2007.

[Neil et al, 2008] M. NEIL, M. TAILOR, D. MARQUEZ, N. FENTON, P. HEARTY «Modeling dependable systems using hybrid Bayesian networks ». Reliability Engineering and System Safety 93 (7), 933–939, 2008.

[Nicholsona et Floresb, 2011] A. E. NICHOLSONA, M. J. FLORESB «Combining state and transition models with dynamic Bayesian networks». *Ecological Modelling* 222 (2011) 555–566.

[Perez Casandeas, 2009] G.A. PEREZ CASANDEAS. Thèse de doctorat «Evaluation par simulation de la sûreté de fonctionnement de systèmes en contexte dynamique hybride». Université de Nancy, 2009.

[Pourret et al, 2008] O. POURRET, P. NAÏM, B. MARCOT « Bayesian Belief Networks: A Practical Guide to Applications ». John Wiley.

[Sadou , 2007] N. SADOU. Thèse de doctorat «Aide à la conception des systèmes embarqués sûrs de fonctionnement». Université de Toulouse, 2007.

[Schoenig, 2004] R. SCHOENIG. Thèse de doctorat «Définition d'une méthodologie de conception des systèmes mécatroniques sûrs de fonctionnement». Institut National Polytechnique de Lorraine, 2004.

[Serrou et Leray, 2006] A. SERROUR, P. LERAY « Étude Comparative des outils manipulant les réseaux bayésiens » Délivrable N°7, 2006.

[Sucar et Torres-Toledano, 1998] J.G. TORRES-TOLEDANO, L.E. SUCAR «Bayesian Networks for Reliability Analysis of Complex Systems». *Lecture Notes In Computer Science*; Vol. 1484. Proceedings of the 6th Ibero-American Conference on AI: Progress in Artificial Intelligence. Pages: 195–206, ISBN: 3-540-64992-1.

[Verron, 2007] S. VERRON. Thèse de doctorat «Diagnostic et surveillance des processus complexes par reseaux bayesiens» Université d'Angers, 2007.

[Villemeur, 1988] J.A. VILLEMEUR «Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité - Facteurs humains – Informatisation». Edition EYROLLES, 1988.

[Weber et al, 2010] P. WEBER, G. MEDINA-OLIVA, C. SIMON, B. IUNG «Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas». *Engineering Applications of Artificial Intelligence* , doi:10.1016/j.engappai.2010. 06.002.

[Weber et Jouffe, 2006] P. WEBER, L. JOUFFE « Complex system reliability modelling with Dynam Object Oriented Bayesian Networks (DOOBN) ». *Reliability Engineering and System Safety* 91 (2006) 149–162.

[Weissenbacher, 2008] D. WEISSENBACHER. Thèse de doctorat « Influence des annotations imparfaites sur les systèmes de Traitement Automatique des Langues, un cadre applicatif : la résolution de l'anaphore pronominale ». Université Paris-Nord – Paris 13, 2008.

[Welch et Thelen, 2000] R.WELCH, T. THELEN «Dynamic reliability analysis in an operational context: the Bayesian network perspective ». *Dynamic reliability: future directions*. Maryland, USA, ISBN: 09652669 3 1.

[Zille, 2009] V. ZILLE. Thèse de doctorat «Modélisation et évaluation des stratégies de maintenance complexes sur des systèmes multi-composants». Université de Troyes, 2009.

---

# **ANNEXE**

## I. Méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement

### I. 1. Analyse Préliminaire des Dangers/Risques (APD)

L'APD a été utilisée au début des années 60 aux Etats Unis pour l'analyse de sécurité de missiles. Elle est utilisée dans les premières phases de conception d'un système et constitue un premier outil d'identification des risques potentiels. Elle est mise en œuvre avant une étude de sûreté de fonctionnement plus ne, telle qu'une Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets. Le principe de cette analyse consiste à rechercher les entités et les situations dangereuses ainsi que les accidents potentiels à partir de la connaissance et de l'expérience des spécialistes. Il est recommande d'utiliser cette analyse des les premières phases de la conception.

### I. 2. Arbre de conséquence

La méthode de l'arbre de conséquence (ou arbre d'événements) consiste à établir les conséquences faisant suite à un événement initiateur et les enchaînements possibles des fonctionnements ou dysfonctionnements des différentes parties du système (phénomènes de propagation). Un exemple est donné ci-dessous.

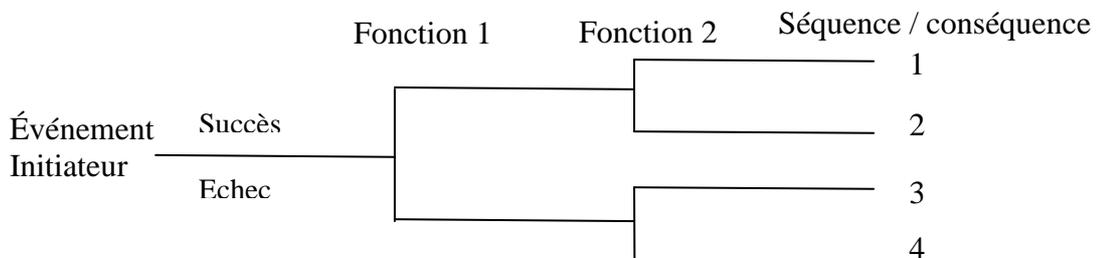


Fig. A.1. Arbre de conséquence.

Cette méthode permet par propagation d'évaluer les probabilités d'occurrence d'un événement associé à une branche quelconque de l'arbre en tenant compte des dépendances entre événements amonts (notamment les dépendances de type cause commune et de type séquentiel)

### I. 3. Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR)

La méthode des Combinaisons de Pannes Résumées a été créée pour l'analyse de sécurité des avions Concorde et Airbus. Elle permet de mettre en évidence les combinaisons de défaillance conduisant à des événements indésirables ainsi que de regrouper les pannes ayant les mêmes effets et de tenir compte des systèmes élémentaires. Cette méthode se divise en quatre principales étapes :

1. décomposition du système global en sous-système ;
2. élaboration des pannes résumées internes ;
3. élaboration des pannes résumées externes ;
4. élaboration des pannes résumées globales.

La méthode MCPR complète une analyse AMDE et regroupe les pannes ayant les mêmes effets et tient compte des interactions entre les différents sous-systèmes. A partir de cette méthode, il est facile de construire un Arbre des Causes dans le but d'aborder l'aspect quantitatif manquant à cette méthode.

#### **I. 4. Méthode du Diagramme Causes-Conséquences (MDCC)**

La méthode *MDCC* a été développée par le laboratoire Riso au Danemark dans les années 70. Comme son nom l'indique, cette méthode comporte deux grandes parties : une partie Cause et une partie Conséquence. La partie Cause consiste à utiliser les principes de la Méthode de l'Arbre des Causes (*MAC*) et permet de représenter les causes d'un événement sommet conduisant à des conséquences indésirables.

La partie conséquence basée sur les principes de la Méthode des Arbres de Conséquences (*MACQ*) permet de déterminer les conséquences que peut subir un système lorsque les événements sommets se réalisent.

La méthode *MDCC* suit, simultanément, les principes de la méthode *MAC* et de la méthode *MACQ*. La Méthode de l'Arbre des Causes (*MAC*), développée dans les années 60, est une représentation statique du système et consiste à considérer une défaillance donnée du système et à construire l'ensemble des combinaisons de défaillances des composants. L'événement indésirable est placé au sommet de l'arbre et l'analyse a pour but de déterminer toutes les causes liées à cet événement. Cette méthode a pour objectifs la détermination des différentes combinaisons possibles entraînant l'événement redouté ainsi que la représentation graphique arborescente de ces combinaisons.

La Méthode de l'Arbre des Conséquences (*MACQ*), utilisée dans les années 70 aux États-Unis, est une méthode inductive permettant d'élaborer et d'évaluer des séquences d'événements. Elle est généralement employée en liaison avec la méthode *MAC* décrite précédemment.

#### **I. 5. Table de Vérité (TV)**

Basée sur l'algèbre booléenne, la méthode de la Table de Vérité permet d'identifier tous les états (fonctionnements et pannes) du système à partir de comportements binaires. Le principe de cette méthode consiste à décomposer le système et à recenser les modes de défaillances des différents composants, ainsi que leurs états de panne. Chaque composant est caractérisé par un état de fonctionnement (1) ou par un état de panne (0). Établir la Table de Vérité d'un système consiste à analyser les effets de tous les vecteurs des états des composants et à déterminer tous les mauvais fonctionnements du système. À partir de cette table, il est facile de déduire les combinaisons de défaillance et les pannes conduisant à un événement indésirable, cette méthode est limitée à des systèmes simples avec un nombre faible de composants. Néanmoins, on peut utiliser cette méthode après décomposition du système à un niveau où le nombre de combinaisons de défaillance reste acceptable.

## II. Méthode de la fiabilité dynamique

### II. 1. Méthodes analytiques et semi-analytiques

$$\Pi(x, i, t) = \int \Pi(u, i, 0) \delta[x - g_i(t, u) \exp\{-\lambda_i[g_i(s, u)]ds\}] du + \sum_{j \neq i} \int p(j \rightarrow i / u) du * \int_0^t \lambda[x - [g_i(t - \tau, u)] * \exp\left\{-\int_0^{t-\tau} \lambda_i[g_i(s, u)]ds\right\}] * p(j \rightarrow i / u)$$

$\Pi(x, i, t)$  représente la densité de probabilité de trouver le système au temps  $t$  dans l'état discret  $i$  où le vecteur  $u$  des variables physiques prend la valeur  $x$ . la forme intégrale est équivalente à un arbre d'événement où le branchement arrive de façon continue.

$g_i(t, u)$  représente la trajectoire suivie par les variables physiques dans l'état discret  $i$  jusqu'à l'instant  $t$ .  $\delta$  est la fonction de Dirac qui permet de ne retenir que les trajectoires menant à  $x$  à l'instant  $t$ .  $\lambda_i[g_i(s, u)]$  est le taux global de sortie de l'état  $i$  qui dépend des variables physiques (et donc de la trajectoire).  $p(j \rightarrow i / u)$  est la probabilité de transition de l'état  $j$  vers l'état  $i$  au point  $u$ . cette expression est la somme de deux contribution : la première correspond au cas où le système est resté dans l'état  $i$  pendant l'intervalle  $[0, t]$

La deuxième correspond aux cas où le système est passé d'un autre état  $j$  à l'état  $i$  à l'instant  $\tau$ . si on prend  $\Pi(x, i, t) = \delta_{i1} \delta(u - x_0)$ , alors chaque terme de la série correspond à un développement de l'arbre d'événement selon ses différentes bifurcations.

### II. 2. Statecharts

Le formalisme des Statecharts est un formalisme visuel créé par Harel pour la spécification des parties structurelles et comportementales des systèmes en cours de développement. Il permet de décrire de façon hiérarchique le comportement dynamique d'un système à l'aide d'états et d'événements. Ainsi, suivant ce modèle, le système peut se trouver dans différents états et subir des transitions d'un état à un autre suite à l'apparition de certains événements. Ces événements sont diffusés et reçus instantanément, qualifiant ainsi ce modèle de synchrone. De ce fait, l'hypothèse synchrone permet de tirer un certain nombre de transitions au même instant (durées des transitoires nulles) afin d'atteindre un état atomique de la description. Les Statecharts permettent de représenter les machines à états complexes sous des formes plus abstraites que les machines à états finis (MEF) conventionnelles. Ainsi des opérateurs de parallélisme et d'abstraction ont été définis comme, par exemple, les opérateurs XOR et AND.

Le symbolisme graphique de ce formalisme est principalement composé de :

- **arrondis pouvant être emboîtés** : ce sont les états, éventuellement hiérarchiques. Des sous-groupes d'états d'un sous-groupe d'états sont en disjonction (par exemple C et D du groupe B). Une telle décomposition en états est un « ou exclusif » : le système est soit dans C, soit dans D.
- **flèches étiquetées** : elles représentent les transitions, dont les étiquettes sont de la forme suivante : « événement (condition) / actions ». Les actions sont exécutées lorsque les conditions sont vraies et sur occurrence des événements associés. Une flèche sans état d'origine pointe sur l'état par défaut.
- **connecteur H** : ceci permet de conserver l'historique des derniers états visités.

- **lignes pointillées** : elles permettent de séparer un groupe d'états en deux sous-groupes. Elles correspondent à la conjonction entre les deux. Le groupe d'états est alors le produit orthogonal des sous-groupes. Une telle décomposition en états est un «et », le système est dans deux états à la fois.

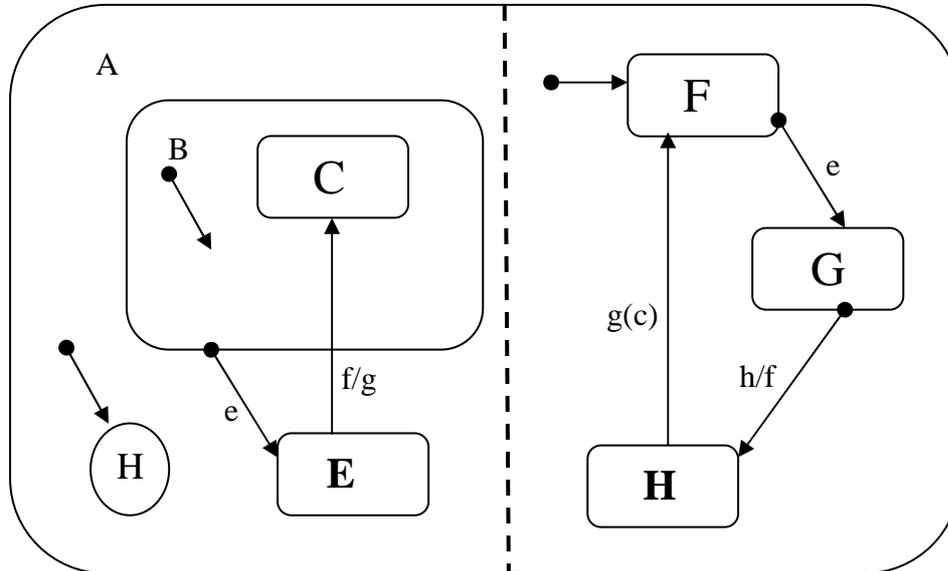


Fig. A. 2. Exemple de statecharts.