

JEAN-BAPTISTE MENYE

# **VALIDATION DE LA MAINTENABILITÉ ET DE LA DISPONIBILITÉ EN CONCEPTION D'UN SYSTÈME MULTI-COMPOSANTS**

Thèse en cotutelle présentée  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de doctorat en génie mécanique  
pour l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph.D.)

DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE  
FACULTÉ DE SCIENCES ET GENIE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

et

à l'École Doctorale Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur  
pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de Strasbourg (Dr.)

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG  
STRASBOURG  
FRANCE

2009

## Résumé

La problématique abordée dans cette thèse concerne la prise en compte et la validation, au stade de la conception, de la maintenabilité et de la disponibilité des systèmes multi composants. Chaque composant est assujéti à des défaillances aléatoires. La défaillance d'un composant entraîne la défaillance du système. À chaque composant  $i$  on associe un taux de défaillance  $\lambda_i$  et une moyenne des temps techniques de réparation  $MTTR_i$ . Le taux de panne est généralement obtenu à partir de bases de données disponibles ou à partir d'essais accélérés sur des prototypes physiques ou virtuels. Le  $MTTR_i$  dépend de la structure du système, des types de liaisons utilisés, de l'accessibilité, de l'outillage, de la compétence du réparateur, de l'environnement, des procédures de diagnostic et de localisation des défaillances et des procédures utilisées pour effectuer les tests de bon fonctionnement. La maintenabilité et la disponibilité sont généralement validées a postériori. Cette thèse propose des outils permettant au concepteur de prendre en compte les exigences de maintenabilité (accessibilité, modularité, testabilité...), d'estimer les  $MTTR_i$ , d'évaluer le  $MTTR$  du système et enfin de déterminer les  $MTTR_i$  qui minimisent le  $MTTR$  du système et qui maximisent, par le fait même, sa disponibilité. Ces outils font appel aux concepts de fiabilité, d'analyse probabiliste des systèmes, de logistique, à la conception assistée par ordinateur, aux approches de conception pour assemblage et désassemblage et aux outils de la programmation mathématique. Cette thèse aborde aussi la prise en compte du contexte d'exploitation pour atteindre le niveau de disponibilité requis. De plus en plus de constructeurs offrent des services de maintenance à leurs clients. Les contrats de services comportent généralement des articles qui spécifient le niveau de disponibilité désiré. Les conditions d'exploitation et de maintenance ont un impacte significatif sur les coûts et la disponibilité des systèmes. Cette thèse propose des modèles mathématiques pour définir la taille et la composition de l'équipe de maintenance qui permet de garantir un seuil de disponibilité du système tout en respectant des contraintes budgétaires. Ces réalisations ont fait l'objet de trois publications et plus de huit communications. Plusieurs extensions de ces travaux sont en cours de réalisation.

## Abstract

The problem addressed in this thesis concerns the validation of maintainability and availability of multi-component systems at the design. Each component is subjected to random failures. The component failure causes the system failure. For each component  $i$  we associate a failure rate  $\lambda_i$  and a mean time to repair  $MTTR_i$ . The failure rate is usually obtained from available databases or from accelerated tests on physical or virtual prototypes. The  $MTTR_i$  depends on the structure of the system, the types of links used, the accessibility, the tools used, the competence of the repairer, the environment, the procedures for diagnosis and localization of failures and the procedures used for check out. Maintainability and availability are generally validated after the design stage. This thesis provides tools for the designer to take into account the maintainability requirements (accessibility, modularity, testability ...), to estimate  $MTTR_i$ , to evaluate the  $MTTR$  of the system and to determine the  $MTTR_i$  which minimize the  $MTTR$  of the system and maximize, by extension, its availability. These tools make use of reliability concepts, systems probabilistic analysis, logistics, computer-aided design, design for assembly and disassembly approaches and mathematical programming tools. This thesis also addresses taking into account the operating environment, at the design stage, to achieve the required level of availability. More and more manufacturers offer maintenance services to their customers. Service contracts generally specify the desired level of availability. The operating and maintenance conditions have a significant impact on systems costs and availability. This thesis presents mathematical models to define the size and composition of the maintenance team that ensures the desired level of system availability while respecting budgetary constraints. These achievements led to three publications and more than eight communications. Several extensions of this research are in progress.

# Remerciements

Tout d'abord, je remercie l'Éternel Dieu Tout Puissant pour m'avoir conduit jusqu'ici.

Cette thèse s'est déroulée dans le cadre d'une cotutelle entre l'université Laval (Canada) et l'Université de Strasbourg (France). Je remercie mes directeurs de thèse :

- M. Daoud Ait-Kadi, Professeur à l'Université Laval, pour sa disponibilité, ses conseils et tout le soutien financier qu'il m'a apporté durant toutes ces années. J'ai beaucoup appris auprès de lui et je lui en suis entièrement reconnaissant.
- M. Emmanuel Caillaud, Professeur des Universités, et M. Amadou Coulibaly, Maître de Conférences - HDR à l'Université de Strasbourg, pour leur disponibilité, leurs conseils et l'accueil très chaleureux qu'ils m'ont réservé lors de mon séjour à Strasbourg.

Mes sincères remerciements vont également à M. Roland Maranzana, Professeur à l'École de Technologie Supérieure de Montréal, à M. Mohamed-Salah Ouali, Professeur à l'École Polytechnique de Montréal et à M. François Perès, Maître de Conférences – HDR à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, pour avoir accepté d'évaluer cette thèse.

Mes remerciements aussi à M. Augustin Gakwaya, Professeur de l'Université Laval, et à M. Anouar Jamali, Professeur à l'Université du Québec à Trois Rivières, qui ont évalué une étape intermédiaire de cette thèse.

J'aimerais aussi remercier tous ceux que j'ai côtoyés à l'Université Laval, en particulier les collègues du groupe de recherche du Professeur Ait-Kadi et le personnel du département de génie mécanique, notamment, Mesdames Sylvie Brodeur, Diane Moore et Johanne Pouliot.

Enfin, un gros merci à mes frères, à mes sœurs et à mes parents qui m'ont soutenu et encouragé de loin, aux Pasteurs Simon-Pierre Ngomo et Ndo Ze pour leur soutien spirituel, à mes enfants, Jean-Baptiste et Séphora, et à mon épouse, Chantal, pour l'énergie qu'ils m'ont toujours donnée au moment opportun et pour tous les sacrifices qu'ils ont dû consentir durant toutes ces années. Je n'oublie pas tous les autres qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre durant ce temps. À vous tous, je vous dis MERCI!

*À la mémoire de mon père,  
à ma mère, à mon épouse et à mes enfants.*

# Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Remerciements.....	iii
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures.....	ix
Chapitre 1 Introduction.....	1
1.1 Contexte.....	1
1.2 Problématique.....	1
1.3 Objectifs.....	4
1.4 Contenu de la thèse.....	6
Chapitre 2 Rappels des concepts et notions utilisés.....	8
2.1 Introduction.....	8
2.2 Définitions et modélisation de produit.....	8
2.2.1 Définition de produit.....	8
2.2.2 Modélisation de produit.....	8
2.3 Définition des exigences.....	12
2.4 Processus de conception et validation du produit.....	13
2.4.1 Processus de conception de produits.....	13
2.4.2 Validation de produit en conception.....	15
2.5 Quelques rappels sur la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité.....	18
2.5.1 Fiabilité, $R(t)$ .....	18
2.5.2 Maintenabilité.....	24
2.5.3 Disponibilité.....	27
2.6 Allocation de fiabilité et de maintenabilité.....	28
2.6.1 Définition.....	28
2.6.2 Méthodes d'allocation de fiabilité.....	28
2.6.3 Allocation de maintenabilité.....	32
2.7 Prise en compte du contexte d'exploitation du système.....	34
2.7.1 Facteurs contextuels influençant la disponibilité, la fiabilité et la maintenabilité.....	34
2.7.2 Évaluation de l'impacte des facteurs contextuels sur la sûreté de fonctionnement.....	34
2.7.3 Prise en compte du contexte d'exploitation en conception.....	34
2.7.4 Estimation des ressources humaines.....	36
2.8 Conclusion.....	37
Chapitre 3 Indicateurs de maintenabilité et de disponibilité en conception.....	38
3.1 Introduction.....	38
3.2 Indicateurs de maintenabilité en conception.....	40
3.2.1 Indicateurs de maintenabilité en exploitation.....	40
3.2.2 Obtention des données.....	46
3.2.3 Indicateurs de maintenabilité pouvant être évalués en conception.....	53
3.3 Indicateurs de disponibilité en conception.....	55
3.3.1 Indicateurs de disponibilité en exploitation.....	55

3.3.2	Sources d'obtention des données.....	58
3.3.3	Indicateurs de disponibilité pouvant être évalués en conception.....	59
3.4	Conclusion.....	60
Chapitre 4	Modélisation du processus de validation de la maintenabilité et de la disponibilité d'un système en phase de conception.....	62
4.1	Introduction.....	62
4.2	Processus générique de validation d'une performance comportementale.....	62
4.3	Processus de validation du <i>MTTR</i> en conception.....	65
4.3.1	Étape 1 : Processus de collecte des données.....	68
4.3.2	Étape 2 : Processus d'évaluation du <i>MTTR<sub>s</sub></i> .....	72
4.3.3	Étape 3 : Processus d'analyse des résultats de l'évaluation du <i>MTTR<sub>s</sub></i> .....	79
4.4	Processus de validation de <i>UTR</i> en conception.....	83
4.4.1	Étape 1 : Processus de collecte des données.....	83
4.4.2	Étape 2 : Processus d'évaluation de <i>UTR<sub>s</sub></i> .....	84
4.4.3	Étape 3 : Processus d'analyse des résultats de l'évaluation de <i>UTR<sub>s</sub></i> .....	87
4.5	Conclusion.....	87
Chapitre 5	Optimisation du temps de désassemblage des composants d'un système mécanique en phase de conception.....	89
5.1	Introduction.....	89
5.2	Hypothèses.....	89
5.3	Méthodologie d'optimisation du temps de démontage des composants en conception.....	92
5.3.1	Étape 1 : identification des connexions entre les composants.....	93
5.3.2	Étape 2 : définition des types de liaisons et estimation du temps de démontage.....	95
5.3.3	Étape 3 : identification des sous-assemblages et transitions réalisables.....	97
5.3.4	Étape 4 : génération des séquences de transitions.....	100
5.3.5	Étape 5 : sélection optimale des types de liaisons.....	103
5.4	Exemple d'application.....	111
5.4.1	Étape 1 : identification des connexions.....	112
5.4.2	Étape 2 : définition des types de liaisons et du temps de démontage.....	112
5.4.3	Étape 3 : identification des sous-assemblages et transitions réalisables.....	116
5.4.4	Étape 4 : génération des séquences de transitions.....	119
5.4.5	Étape 5 : sélection optimale des types de liaisons.....	121
5.5	Conclusion.....	126
Chapitre 6	Définition des besoins en ressources humaines pour la maintenance d'un système en phase de conception.....	128
6.1	Introduction.....	128
6.2	Facteurs contextuels influençant la disponibilité et enjeux des ressources humaines.....	129
6.2.1	Facteurs contextuels influençant la disponibilité.....	129
6.2.2	Enjeux des ressources humaines pour la maintenance.....	129
6.3	Méthodologie de définition des besoins en ressources humaines pour la maintenance.....	130
6.3.1	Étape 1 : Identification des profils D'opérateurs de maintenance.....	130

6.3.2	Étape 2 : Détermination du nombre d'opérateurs par profil .....	135
6.4	Illustration .....	143
6.5	Conclusion .....	148
Chapitre 7	Conclusion générale.....	150
Bibliographie	.....	156



## Liste des tableaux

Tableau 1.1 Positionnement des réponses aux questions dans les chapitres .....	6
Tableau 2.1 Relations entre les quatre caractéristiques de fiabilité .....	21
Tableau 2.2 Critères contextuels.....	35
Tableau 3.1 Étapes du cycle de maintenance .....	42
Tableau 3.2 Indicateurs de durées de maintenance active .....	43
Tableau 3.3 Indicateurs de fréquence des activités de maintenance.....	44
Tableau 3.4 Indicateurs de temps de main d'œuvre .....	45
Tableau 3.5 Indicateurs de coûts de maintenance.....	46
Tableau 3.6 Quelques bases de données de fiabilité.....	50
Tableau 3.7 Synthèse des paramètres dans chaque famille d'indicateurs de maintenabilité	54
Tableau 3.8 Expressions des temps logistiques et administratifs. ....	58
Tableau 3.9 Paramètres d'indicateurs de disponibilité .....	60
Tableau 4.1 Matrice sémantique.....	69
Tableau 5.1 Matrice de transitions.....	100
Tableau 5.2 Types de liaisons possibles par connexion et contraintes associées .....	114
Tableau 5.3 Durées de démontage des types de liaison potentiels .....	115
Tableau 5.4 Outils potentiels par type de liaison et durée de démontage correspondante .	116
Tableau 5.5 Matrice de transitions.....	117
Tableau 5.6 Connexions, sous-assemblages parent et héritiers des transitions .....	118
Tableau 5.7 Séquences de transitions possibles pour l'extraction de chaque composant ..	120
Tableau 5.8 Résultats du modèle de sélection des types de liaison.....	122
Tableau 5.9 Séquences optimales et leur durée .....	122
Tableau 5.10 Coût d'achat unitaire des outils.....	123
Tableau 5.11 Taux de panne des composants, nombre et coûts des pièces de rechange....	124
Tableau 5.12 Salaires horaires et tâches alloués aux opérateurs .....	124
Tableau 5.13 Résultats du modèle .....	125
Tableau 5.14 Séquences optimales et leur durée .....	126
Tableau 6.1 Profils aptes à exécuter chaque tâche et la durée totale requise (en heures)...	144
Tableau 6.2 Données sur les profils.....	145
Tableau 6.3 Durée et coût d'exécution par le sous-traitant .....	145
Tableau 6.4 Tâches exclusives aux profils appartenant au sous-ensemble $X_\alpha$ .....	146
Tableau 6.5 Synthèse des résultats des deux approches .....	148
Tableau 6.6 Synthèse des résultats des deux approches (cas $N_4^{\min} = 0$ ).....	148

## Liste des figures

Figure 1.1	Processus de conception sans pré-validation des exigences en conception .....	2
Figure 1.2	Processus de conception avec pré-validation des exigences en conception.....	3
Figure 2.1	Décomposition structurelle d'un système .....	10
Figure 2.2	Perception Fonction-Structure-Comportement du produit.....	11
Figure 2.3	Durée de vie d'un système .....	18
Figure 2.4	Évolution du taux de panne (courbe en baignoire).....	22
Figure 2.5	Allure des courbes de taux de pannes .....	23
Figure 4.1	Processus générique de validation d'une performance comportementale.....	64
Figure 4.2	Étapes agrégées du processus de validation du $MTTR_s$ .....	66
Figure 4.3	Processus intégré de validation du $MTTR_s$ .....	67
Figure 4.4	Décomposition du processus de collecte de données .....	68
Figure 4.5	Détails des étapes du processus de collecte de données.....	70
Figure 4.6	Étapes du processus d'évaluation du $MTTR_s$ .....	73
Figure 4.7	Détails des étapes du processus d'évaluation du $MTTR_s$ .....	77
Figure 4.8	Processus d'analyse des résultats et détails de ses étapes .....	80
Figure 4.9	Procédure d'identification des composants à améliorer.....	81
Figure 4.10	Procédure d'amélioration du $MTTR_s$ .....	82
Figure 4.11	Processus intégré d'évaluation et de validation du $UTR_s$ .....	85
Figure 4.12	Détails des étapes supplémentaires du processus de validation du $UTR_s$ .....	86
Figure 5.1	Processus d'optimisation du temps de démontage des composants.....	93
Figure 5.2	Exemple de système à 4 composants : .....	94
Figure 5.3	Exemple de types de liaisons possibles pour la connexion B-C .....	96
Figure 5.4	Illustration d'une transition .....	98
Figure 5.5	Procédure ascendante de détermination des séquences de désassemblage .....	102
Figure 5.6	Assemblage linéaire .....	111
Figure 5.7	Graphe et matrice de connexions .....	112
Figure 6.1	Processus de définition des profils d'opérateurs de maintenance .....	132
Figure 6.2	Modèle tâches-compétences-profils .....	134
Figure 6.3	Affectation des tâches aux profils .....	137
Figure 6.4	Contraintes et données d'entrée et de sortie des modèles .....	139

# **Chapitre 1 Introduction**

## **1.1 Contexte**

De nos jours, les nouveaux produits mis sur le marché sont de plus en plus complexe. Cette complexité vient en partie du fait que les fonctions que les systèmes doivent assurer requièrent l'intégration de plusieurs composants utilisant des technologies différentes. Le concepteur doit intégrer dans son processus toutes les phases du cycle de vie du système et de ses composants. Il doit opter pour des solutions qui sont simples à produire, peu coûteuses, très fiables, sécuritaires, faciles à entretenir et ayant un coût global sur tout le cycle de vie qui soit attrayant pour le consommateur.

Les récentes préoccupations en matière d'environnement et de développement durable ont conduit à l'émergence de nouvelles façons de faire en matière de conception, de fabrication, de distribution, de récupération et de valorisation des produits. Ces nouvelles façon imposent d'accorder une place privilégiée à de caractéristiques qui définissent l'état du système tout au long de son cycle de vie. Parmi ces caractéristiques, on note : la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité, la recyclabilité, la sécurité, etc.

Pour la validation de ces caractéristiques, des tests d'homologation, effectués selon un protocole bien défini, sont généralement réalisés pour les produits standards, et ce avant leur mise en marché. Pour les produits conçus selon les spécifications d'un client particulier, des tests de bon fonctionnement sont effectués avant la prise de possession du produit par le client. Pour des systèmes dont les défaillances accidentelles peuvent être lourdes de conséquences, les tests de validation de caractéristiques telles que la fiabilité, la maintenabilité ou la disponibilité sont effectués sur des prototypes physiques.

## **1.2 Problématique**

La problématique réside dans :

- l'identification des caractéristiques à valider. Ces caractéristiques doivent être nécessairement quantifiables au moyen des mesures directes ou indirectes.

- La mise au point des méthodes permettant d'apprécier en totalité ou en partie ces caractéristiques en phase de conception.

Les niveaux requis pour ces caractéristiques sont exprimés sous forme d'exigences dans le cahier des charges. Actuellement, la validation des certaines de ces exigences, en particulier celles relatives aux caractéristiques dites comportementales, comme la maintenabilité, la fiabilité ou la disponibilité, est effectuée uniquement au moyen des tests sur des prototypes physiques, en aval de la phase de conception (figure 1.1). Un problème se pose lorsque les résultats des tests ne sont pas satisfaisants. On doit alors modifier le système et recommencer les essais jusqu'à l'obtention de résultats satisfaisants. Le nombre de cycles de modifications peut devenir très élevé. La conséquence en est que les coûts et les délais de développement du système peuvent augmenter considérablement. Il faudrait donc trouver des moyens pour limiter cette augmentation.

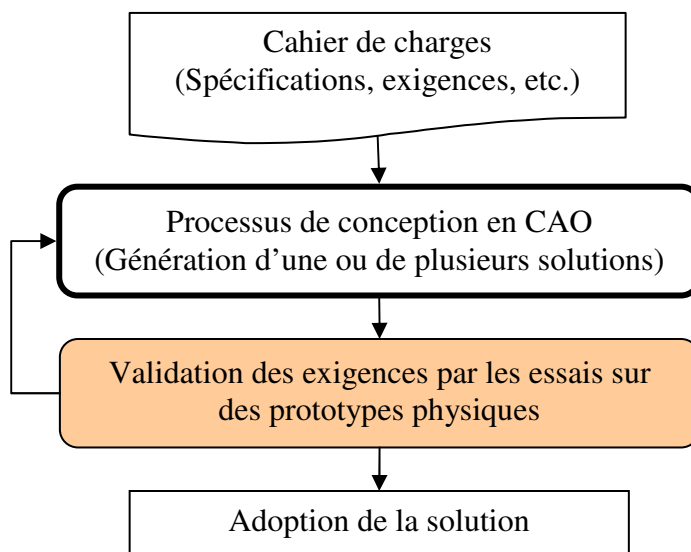


Figure 1.1 Processus de conception sans pré-validation des exigences en conception

Un des moyens pour y parvenir est d'effectuer une pré-validation en phase de conception (figure 1.2). Il va de soi que la pré-validation en phase de conception est beaucoup moins coûteuse en temps et en argent. Elle permettra de n'envoyer aux essais sur prototypes physiques que des solutions qui sont plus aptes à les réussir avec moins de modifications.

Il existe déjà des outils permettant une pré-validation, en phase de conception, de certaines caractéristiques d'ordres fonctionnels et structurels. C'est le cas par exemple des modules de simulation cinématiques ou dynamiques et des modules d'éléments finis disponibles dans les systèmes CAO (Conception Assisté par Ordinateur).

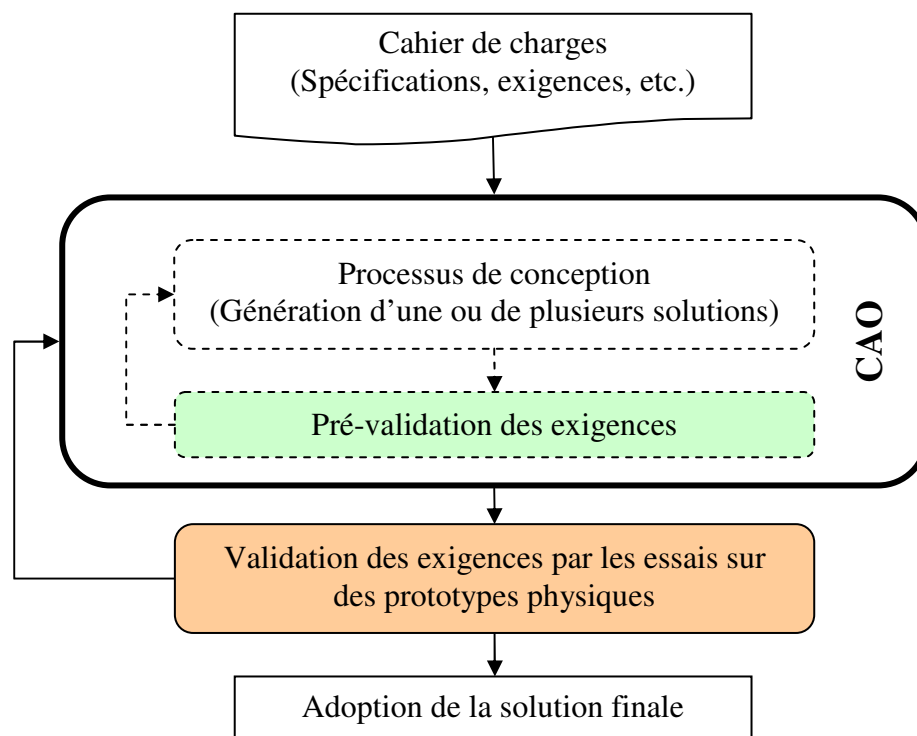


Figure 1.2 Processus de conception avec pré-validation des exigences en conception

En revanche, des outils similaires pour la pré-validation des exigences comportementales en conception ne sont pas disponibles dans les logiciels de CAO actuels. Il faut donc les développer. Il existe cependant quelques logiciels autonomes, non intégrés à la CAO, qui permettent seulement d'évaluer certaines caractéristiques comportementales comme la fiabilité ou la maintenabilité d'un système en phase de conception. Comme exemples de ces logiciels, on peut citer *Relax Reliability Studio* développé par Relax Software Corporation ou *Item Toolkit* développé par Item Software. Ces logiciels ne permettent, par ailleurs, pas

de valider des exigences de fiabilité ou de maintenabilité. Ils se limitent uniquement à l'évaluation de la caractéristique concernée.

Il va de soi que, d'une exigence comportementale à l'autre, l'outil de pré-validation ne sera pas le même. Les questions qui se posent donc, pour une exigence donnée, sont les suivantes : comment s'y prendre pour la pré-validation en conception ? De quoi a-t-on besoin ? À quelle phase du processus de conception peut-on mettre en œuvre la pré-validation ? Pour répondre à ces questions, un projet de recherche sur l'évaluation des performances comportementale en conception a été initié il y a plusieurs années par les Professeurs Ait-Kadi de l'Université Laval et Coulibaly de l'INSA de Strasbourg. Une présentation de ce projet recherche est fournie dans (Coulibaly, 2008). Cette thèse s'inscrit dans le cadre de ce projet et a pour but de répondre à ces questions en ce qui concerne les exigences de maintenabilité et de disponibilité.

### **1.3 Objectifs**

Deux objectifs spécifiques ont été définis :

- développer des outils permettant d'évaluer et de pré-valider la maintenabilité et la disponibilité d'un système en conception
- prendre en compte, en conception, le futur contexte d'exploitation du système afin d'atteindre effectivement le niveau de disponibilité exigé.

La raison d'être du deuxième objectif est que les caractéristiques annoncées d'un système en sortie de la phase de conception ne sont pas toujours celles observées en phase d'exploitation. Cela est dû au fait que les caractéristiques propres au contexte d'exploitation (compétence des opérateurs, qualité du matériel support disponible, situation géographique, etc.) ont une influence sur les caractéristiques et les performances du système. Pour atteindre effectivement le niveau de maintenabilité ou de disponibilité exigé en opération, il faut prendre en compte, en conception, les caractéristiques propres du futur contexte d'exploitation du système.

Pour atteindre les objectifs ci-dessus, nous nous sommes posé un certain nombre de questions auxquelles nous avons dû répondre. Ces questions sont les suivantes :

1. Quel indicateur de maintenabilité et quel indicateur de disponibilité peuvent être évalués en conception ?
2. Quelles sont les étapes à suivre pour pré-valider, en conception, une exigence de maintenabilité ou de disponibilité formulée avec ces indicateurs ?
3. Pour chaque étape :
  - 3.1. Quelles données d'entrée sont nécessaires ?
  - 3.2. Quelles données de sortie doit-on obtenir ?
  - 3.3. Quels moyens ou outils à mettre en œuvre pour obtenir les données de sortie?
4. Comment aider le concepteur à améliorer une solution qui ne satisfait l'exigence ?
5. Dans le cas où il n'y a pas d'exigences, comment optimiser la maintenabilité d'une solution ?
6. Quels facteurs contextuels (caractéristiques du contexte d'exploitation) ont une influence sur la maintenabilité et la disponibilité du système ?
7. Comment peut-on prendre en compte ces facteurs en phase de conception du système ?

Les réponses apportées à ces questions ont conduit à quatre contributions présentées dans les chapitres 3, 4, 5 et 6. Le tableau 1.1 indique les questions auxquelles répond chaque chapitre.

Tableau 1.1 Positionnement des réponses aux questions dans les chapitres

Questions		Réponses			
		Chapitre 3	Chapitre 4	Chapitre 5	Chapitre 6
1		X			
2			X		
3	3.1		X		
	3.2		X		
	3.3		X	X	
4			X		
5				X	
6					X
7				X	X

## 1.4 Contenu de la thèse

Le contenu de cette thèse se divise en cinq chapitres. Le chapitre 2 présente un rappel des principaux concepts et des principales notions utilisées. Une revue des récents travaux traitant de chacun de ces concepts et notions est aussi présentée. Le chapitre 3 analyse les indicateurs de maintenabilité et de disponibilité couramment utilisés dans la littérature afin de déterminer ceux qui peuvent être évalués en conception. Le chapitre 4 propose une modélisation des processus de validation, en conception, des indicateurs de maintenabilité et de la disponibilité choisis. Un processus générique est d'abord proposé. Ce processus générique est ensuite appliqué aux cas de la validation de la maintenabilité et de la disponibilité par rapport aux indicateurs choisis. Les étapes de chaque processus sont décrites, ainsi que les données d'entrée, les données de sortie et les outils mis en œuvre dans chaque étape. Deux procédures d'analyse des résultats de l'évaluation de l'indicateur de maintenabilité sont présentées. Ces procédures sont utilisées lorsque l'exigence n'est pas satisfaite et que l'amélioration de la solution est envisagée. Comme contribution à



l'optimisation de la maintenabilité du système, le chapitre 5 propose une méthodologie d'optimisation du temps de démontage des composants en phase de conception. Cette méthodologie conduit le concepteur à définir les types de liaisons possibles entre les composants, les contraintes auxquelles ces types de liaisons sont assujettis et l'outillage pouvant être utilisé pour le démontage. Une procédure est proposée pour déterminer toutes les séquences de démontage possibles pour chaque composant. Pour minimiser le temps de démontage des composants, deux modèles mathématiques de sélection optimale des types de liaisons, de l'outillage et de la séquence de démontage sont présentés. Le chapitre 6 présente une méthodologie permettant au concepteur de définir les recommandations en termes de nombre et de compétences des opérateurs de l'équipe de maintenance à mettre en place dans le contexte d'exploitation du système, afin d'aider à atteindre effectivement le niveau de disponibilité exigé. Le concepteur définit les profils d'opérateurs de maintenance en tenant compte des compétences disponibles localement dans le contexte d'utilisation du système. Deux modèles mathématiques sont proposés pour déterminer le nombre d'opérateurs requis pour chaque profil de compétence défini. Le chapitre 7 présente une conclusion générale et les extensions envisagées.

Pour la suite de la thèse, au lieu de parler de « pré-validation », on parlera tout simplement de « validation » pour alléger le texte.

## Chapitre 2 Rappels des concepts et notions utilisés

### 2.1 Introduction

Ce chapitre présente progressivement un rappel des principaux concepts et notions utilisés dans la thèse : de la définition du produit jusqu'à son utilisation, en passant par sa modélisation, la définition de ses exigences et l'influence de son contexte d'utilisation sur ses caractéristiques. Les définitions issues essentiellement des normes sont présentées. Une succincte revue des récents travaux traitant de chaque notion ou concept est aussi présentée.

### 2.2 Définitions et modélisation de produit

#### 2.2.1 Définition de produit

Plusieurs définitions du terme "produit" sont proposées dans la littérature (RG Aéro 000 14 A, 1993), (Kumar *et al.*, 1999), (Hicks *et al.*, 2002). Nous retenons celle fournie par la norme internationale ISO 9000:2000 :

Un **produit** est le «résultat d'un processus», un **processus** étant défini comme un « ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforment des éléments d'entrée en éléments de sortie»

On distingue quatre catégories génériques de produits : les services (les soins médicaux, le transport, etc.); les "software" (les logiciels, les dictionnaires, etc.); les [produits] matériels (les pièces mécaniques de moteur, etc.); les produits issus de processus à caractère continu (les lubrifiants, par exemple)» ISO 9000:2000.

Dans cette thèse, l'objet d'étude est le "produit matériel". Le terme générique "système" est aussi utilisé pour le désigner. Un produit matériel correspond parfaitement à la définition de **système** fournie par ISO 9000:2000: « ensemble d'éléments corrélés ou interactifs ».

#### 2.2.2 Modélisation de produit

De nombreuses modélisations de produit sont proposées dans la littérature. Coulibaly (2008) les classe en deux groupes :

- les approches syntaxiques qui décrivent la structure du produit. Les systèmes CAO utilisent plusieurs modèles issus de cette approche. C'est le cas des modèles géométriques 2D et 3D (Ke-Zhang and Xin-An, 2004) ou topologiques qui font ressortir, par exemple, les sommets et les arêtes (Kahn *et al.*, 2001). D'autres modèles de ce groupe sont disponibles dans (Bronsvort and Noort, 2004), (Brunetti and Golob, 2000), (Deng, 2002), (Gero and Kannengiesser, 2004), (Rajpa *et al.*, 2006), (Roy *et al.*, 2001). Un des modèles auxquels nous faisons référence dans cette thèse est le modèle FBS (*Function, Behavior, Structure*) proposé par Gero (Balachandran and Gero, 1990), (Gero and Kannengiesser, 2006). Nous le présentons un peu plus en détail dans la section 2.2.2.2.
- les approches sémantiques qui décrivent le comportement du produit (Al-Hakim *et al.*, 2000), (Tanaka and Takeshi, 2006). Dans ce groupe, on compte par exemple les modèles utilisant le formalisme UML (*Unified Modeling Language*) (Eynard *et al.*, 2004), (Kikuo, 2002).

### **2.2.2.1 Modélisation structurelle**

Un système (produit matériel) est défini comme étant un ensemble ou un assemblage de plusieurs composants. Un composant peut être une pièce élémentaire (indivisible) ou un sous-assemblage de plusieurs pièces élémentaires. Le niveau supérieur (niveau 0) de l'échelle de décomposition est le système entier. Le niveau le plus bas qu'on puisse atteindre est celui dont tous les composants sont des pièces élémentaires. De façon générale, le schéma de décomposition structurelle a une forme pyramidale et se déroule du sommet vers la base (figure 1.1).

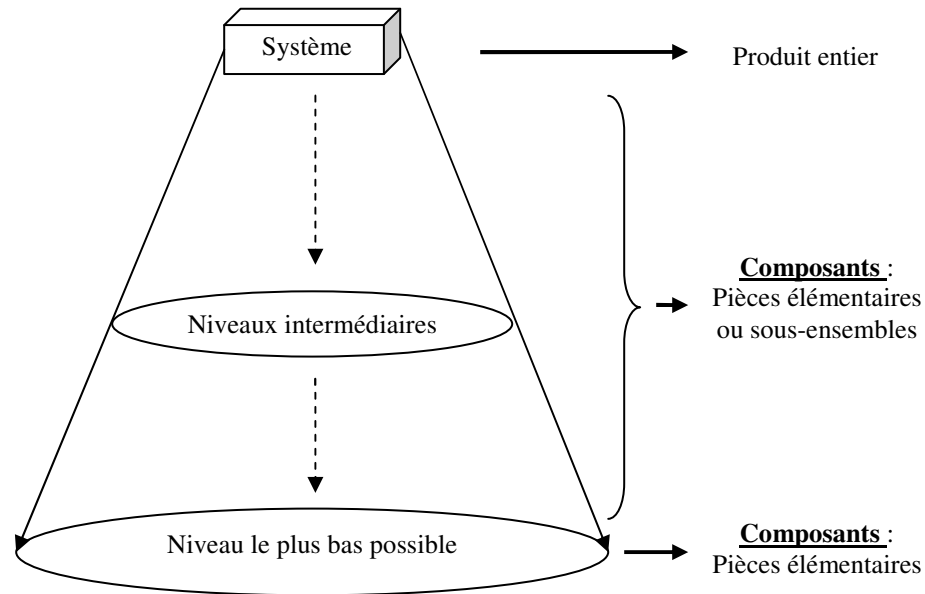


Figure 2.1 Décomposition structurelle d'un système

Le niveau de décomposition auquel on s'arrête va varier selon l'objectif à atteindre. Comme exemples d'objectifs nécessitant une décomposition du système, on peut citer : l'assemblage final; le transport; la maintenance; le recyclage ou la disposition en fin de vie.

Dans le cas de l'assemblage final, on a généralement un seul niveau de décomposition (le niveau 1). Dans le cas du recyclage ou de la disposition en fin de vie, on peut atteindre le niveau le plus bas possible. Si l'objectif est la maintenance, le niveau auquel on s'arrête est celui qui permet d'accéder au composant défaillant. Le nombre de composants d'un niveau est généralement plus grand que celui du niveau supérieur et plus petit que celui du niveau inférieur.

#### 2.2.2.2 Modélisation FBS

La modélisation FBS a été initialement proposée par Gero (Balachandran and Gero, 1990), (Gero and Kannengiesser, 2006), (Gero and Kannengiesser, 2004). Elle permet de représenter un produit dans un espace à trois dimensions ou vues : *Function*, *Behavior*, *Structure* (Fonction, Comportement, Structure). La vue "Fonction" décrit l'aspect fonctionnel du produit. C'est-à-dire les fonctions qu'il doit accomplir. La vue

“Comportement” décrit l’évolution du produit tout au long de son cycle de vie. Cette évolution est régie par les interactions entre le produit et son contexte d’utilisation. Les caractéristiques concernées sont la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité, la recyclabilité, la sécurité, etc. La vue “Structure” décrit les composants et leurs caractéristiques, par exemple, poids, volume, tenue mécanique, fatigue, etc. Les trois vues interagissent en permanence.

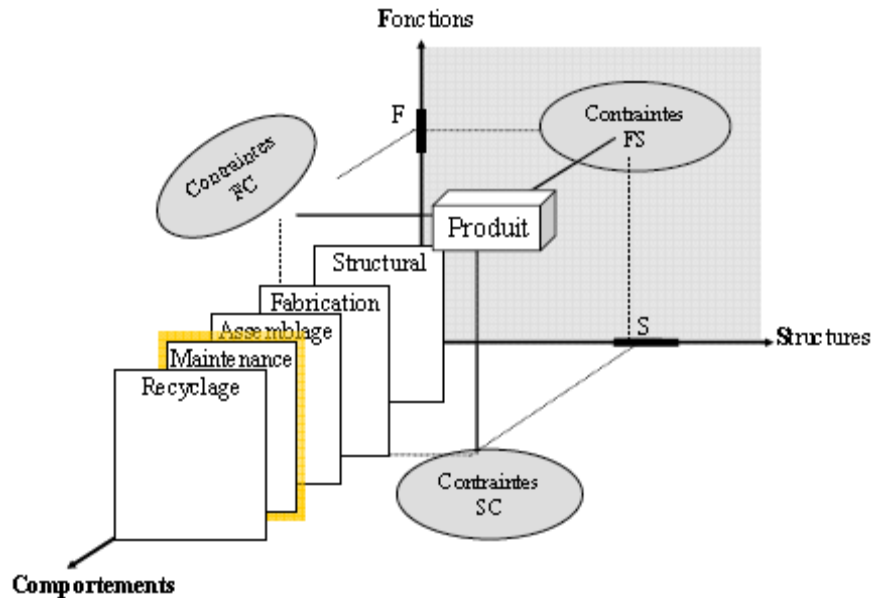


Figure 2.2 Perception Fonction-Structure-Comportement du produit

Source : (Coulibaly, 2008)

Le modèle initial ne proposait pas de formalisation des différentes vues (Dorst and Vermaas, 2005). D’autres travaux ont donc proposé des enrichissements de ce modèle. Par exemple, une formalisation de la vue “Comportements” fait l’objet des travaux de Coulibaly (2008) comme l’indique la figure 2.2. Les travaux de cette thèse constituent une contribution dans cette formalisation, avec pour comportements étudiés la maintenabilité et la disponibilité. D’autres enrichissements sont proposés dans (Chakrabarti and Bligh, 2001), (Deng, 2002), (Deng *et al.*, 2000), (Labrousse and Bernard, 2003), (Labrousse *et al.*, 2004).

## 2.3 Définition des exigences

D'après la norme ISO 9000:2000, le terme **exigence** signifie « besoin ou attente formulées, habituellement implicites, ou imposés ». La norme précise que :

- «habituellement implicite» signifie qu'il est d'usage ou de pratique courante, pour toutes les parties intéressées de considérer le besoin ou l'attente en question comme implicite.
- les exigences peuvent être formulées par chacune des parties intéressées (client, fournisseur, législation, etc.).

Dans le cas spécifique du développement d'un produit matériel, les exigences peuvent porter sur des critères économiques et, selon la modélisation FBS, sur les caractéristiques :

- fonctionnelles : vitesse, portée, charge utile, etc.
- comportementales : disponibilité, fiabilité, maintenabilité, recyclage, sécurité, etc.
- structurelles : dimensions, matériaux, tenue mécanique, etc.

Lorsque les exigences sont formulées de manière écrite, le document les contenant s'appelle **spécification** (ISO 9000:2000). Il est aussi généralement désigné **cahier des charges**.

Il existe différentes normes sectorielles permettant de définir les exigences générales des produits de ces secteurs. Par exemple, la norme ISO/TS 16949 définit les exigences dans le secteur automobile. Les exigences qui nous intéressent dans cette thèse sont celles relatives à la disponibilité, en général, et en particulier, à la maintenabilité qui est l'un des facteurs dont dépend la disponibilité (IEC 60050-191, 1990). La disponibilité et la maintenabilité, ainsi que la fiabilité et le support de maintenance sont regroupés sous le concept de **sûreté de fonctionnement**. La norme ISO 9000:2000 définit la **sûreté de fonctionnement** comme étant l'«ensemble des propriétés qui décrivent la disponibilité et les facteurs qui la conditionnent : fiabilité, maintenabilité et logistique de maintenance». Les lignes directrices et le guide d'application pour la spécification des exigences de sûreté de fonctionnement

sont fournies, respectivement, par les normes IEC 62347 (2006) et IEC 60300-3-4 (2007). Les exigences spécifiques pour la maintenabilité en phase de conception sont spécifiées dans la norme IEC 60706-2 (2006). D'autres travaux de références présentent des exigences pour certains types de systèmes (NASA-Standard -5017, 2006).

## **2.4 Processus de conception et validation du produit**

### **2.4.1 Processus de conception de produits**

#### **2.4.1.1 Définitions**

D'après la norme ISO 9000:2000, le terme **processus** désigne l'«ensemble de moyens et d'activités liés qui transforment des éléments entrants en éléments sortants». Ces moyens peuvent comprendre les techniques, les méthodes et les ressources humaines, matérielles et financières.

La même norme définit l'expression **conception et développement** d'un produit comme étant l'«ensemble de processus qui transforment des exigences en caractéristiques spécifiées ou en spécifications d'un produit».

#### **2.4.1.2 Étapes du processus de conception**

Le développement d'un nouveau produit est initié sur ordre d'un client spécifique ou sur une proposition de produits issue de la planification de la production en interne. Dans la littérature, il existe de nombreux travaux qui traitent de différents aspects de la de conception de produits (Wentzell, 2004), (Kendall, 2005), (Dhillon, 1998), (Kutz, 2006), (Maffin, 1998), (Jaluria, 2008). Plusieurs décrivent le déroulement même du processus de conception (Pahl *et al.*, 2007), (Dieter, 2000), (Giudice *et al.*, 2006), (Ulrich and Eppinger, 2000), (Ullman, 2003). Une fois le besoin exprimé, la première étape qui précède la phase de conception proprement dite est la phase de clarification et de planification (Giudice *et al.*, 2006), (Pahl *et al.*, 2007). Cette phase permet de collecter et d'analyser les informations disponibles afin de clarifier les exigences que doit satisfaire le nouveau produit. Elle débouche sur l'élaboration du cahier des charges qui sera utilisé et mis à jour durant le processus de conception proprement dit.

Après l'élaboration du cahier des charges, la phase de conception proprement dite se déroule généralement en trois étapes (Pahl *et al.*, 2007); (Giudice *et al.*, 2006) ; (Ulrich and Eppinger, 2000) :

- *Définition du concept.* Cette étape permet de générer des idées ou concepts de solutions. Les esquisses de la forme et des principales caractéristiques sont élaborées. Un concept de solution peut être totalement innovant, choisi parmi les concepts déjà existants ou résultat d'une modification d'un concept existant (Jaluria, 2008), (Ullman, 2003). Plusieurs concepts sont généralement élaborés. Chacun d'eux est évalué techniquement et économiquement pour déterminer celui (ceux) qui répond (répondent) le mieux aux exigences.
- *Conception préliminaire.* Dans cette étape, les concepts retenus à l'étape précédente sont développés, leur faisabilité étudiée. Ils sont ensuite transformés en plusieurs solutions génériques qui sont aussi évaluées techniquement et économiquement pour déterminer leurs avantages et inconvénients. On définit ensuite l'architecture et les fonctions des principaux sous-systèmes des solutions génériques retenues. Une première estimation de certains paramètres comme l'encombrement ou la résistance est effectuée à ce niveau. L'étape se termine par l'étude préliminaire des composants et une première sélection des matériaux.
- *Conception détaillée.* Les solutions génériques retenues à l'étape précédente sont traduites en modèles géométriques et leurs composants sont définis en détails. Le choix des matériaux, les études de structure, la définition de la géométrie des composants, leur position relative les uns par rapport aux autres, la définition des types de liaisons entre les composants, etc., font partie des activités qui interviennent à cette étape. Ces activités sont effectuées en tenant compte des spécifications. Toute la documentation liée au produit est élaborée. Pour compléter cette étape, certains travaux préconisent d'effectuer les études sur la fabrication du produit (Ulrich and Eppinger, 2000) et d'autres suggèrent d'intégrer des instructions sur la fabrication, l'assemblage, le transport et l'utilisation dans la documentation finale (Pahl *et al.*, 2007).



Une évaluation des solutions est systématiquement effectuée à chaque étape. Elle permet de s'assurer que les exigences sont respectées au fur et à mesure qu'on avance dans le processus (ISO/TS 16949). Certaines exigences ne peuvent cependant être vérifiées qu'à l'issue de la dernière étape.

## 2.4.2 Validation de produit en conception

### 2.4.2.1 Définition de validation

Plusieurs définitions du terme **validation** sont disponibles dans la littérature. La norme ISO 9000:2000 définit la **validation** comme la «confirmation par des preuves tangibles que les exigences pour une utilisation spécifique ou une application prévues ont été satisfaites». Les conditions d'utilisation peuvent être réelles ou simulées.

Dans la norme IEC 60300-3-4 (2007), cette définition est modifiée pour être présentée comme suit : la validation est la «confirmation au moyen des dispositifs de démonstration d'atteinte des objectifs que les exigences pour une utilisation spécifique prévue ont bien été respectées».

Une autre définition spécifique au secteur de l'aéronautique et spatial, fournie par les normes RG Aéro 000 40 et NF L 00-007 B en vigueur dans ce secteur, est la suivante : « acte ou processus par lequel le réalisateur d'un produit ou d'un procédé le reconnaît capable de satisfaire le besoin pour lequel il a été défini, après l'avoir vérifié en général par le suivi de sa première utilisation». Cette définition présente de légères différences avec celle de l'ISO 9000:2000. Mais, les deux définitions sont plus adaptées à la validation du produit final dans les conditions d'exploitation, et donc en aval de la phase de conception.

Une transposition de ces définitions permet de considérer la **validation d'un produit en conception** comme étant le processus d'examen de la solution en vue de déterminer sa conformité aux exigences formulées dans le cahier des charges. Ces exigences portent généralement sur les aspects techniques (fonctions et structures) du produit, son comportement (fiabilité, maintenabilité, recyclabilité, etc.) et son coût (achat, exploitation, maintenance, etc.) tout au long de son cycle de vie (IEC-60300-3-3, 2004), (Military Handbook – 470A, 1997), (IEC 60300-3-4, 2007), (IEC 60706-2, 2006).

#### 2.4.2.2 Validation de produit en conception

Lorsque la non-conformité d'un système est découverte tardivement après la phase de conception, par exemple lors des essais sur prototypes physiques après la phase de conception, les modifications sont souvent difficiles, longues à effectuer et coûteuses (Salomone, 1995). Pour éviter ces inconvénients, le produit doit être validé dès les premières étapes de sa phase de définition. Ainsi, au terme de chaque étape du processus de conception, une validation des exigences doit être effectuée. Ces validations successives sont appelées revues de conception (ISO 9000:2000). On a donc une revue du concept, une revue de conception préliminaire et une revue de conception détaillée (Stapelberg, 2009). Les exigences vérifiées et la précision des résultats dépendent des données disponibles. Ainsi, lors de la revue conceptuelle, très peu d'exigences peuvent être vérifiées car les données disponibles sont très limitées et peu précises. Par contre, lors de la revue détaillée, la solution est déjà complètement définie, donc un grand nombre d'exigences peut être vérifié. La norme IEC 60706-2 (2006) précise, par exemple, que le type d'analyses pouvant être effectuées à chaque revue d'étape, en ce qui concerne les exigences de maintenabilité.

L'évaluation des performances comportementales en conception est traitée par de nombreux centres de recherche. En France, plusieurs groupes de travail de l'axe conception du pôle STP du GDR/MACS (GDR MACS, 2007), (Zaytoon and Ladet, 2009) se penchent sur cette problématique : MOEP (Approches et Modèles pour l'Évaluation des Performances), le groupe IS3C (Ingénierie des Systèmes de Conception et Conduite du cycle de vie) et le groupe MACOD (Modélisation et Optimisation de la Maintenance Coopérative et Distribuée). Par ailleurs, de nouvelles méthodes de modélisation des données du cycle de vie des produits sont proposées en vue de prendre en compte les données requises pour l'évaluation des performances en conception (Browning, 2001), (Kalligeros *et al.*, 2006), (Siddiqi and de Weck, 2006). Ces travaux sont menés par exemple par le Strategic Engineering Research Group du MIT. D'autres travaux portant sur la validation et l'optimisation de la conception sont conduits par le Cambridge Engineering Design Centre (EDC) (Clarkson and Eckert, 2005), (Corbo *et al.*, 2004), (Hepperle *et al.*, 2007), (Pomares *et al.*, 2004), (Zha Xuan and Du, 2006). Des travaux similaires, plus orientés sur la fiabilité et la maintenabilité des systèmes électroniques, sont effectués au

Japon, par le Precision and Intelligence Laboratory de l'Institute of Technology de Tokyo et en Allemagne par le German Research Center for Artificial Intelligence, DFKI.

Dans les systèmes CAO, il existe des modules permettant de mener des analyses en vue de valider certaines exigences fonctionnelles et structurelles. C'est le cas par exemple des modules de simulation cinématique et dynamique ou les modules de calcul de structures. Par contre, des outils similaires pour la validation des exigences comportementales ne sont pas disponibles en CAO. Cependant, de nombreux travaux sont dédiés à la prise en compte des exigences comportementales en conception à l'aide des approches organisationnelles. Les travaux sur l'ingénierie concourante (Eynard *et al.*, 2005), (Xue and Yang, 2004), (Thimm *et al.*, 2006) ou sur l'approche Design For X (Ostrosi *et al.*, 1995), (Mutel and Coulibaly, 1995), (Huang and Mak, 1999) en sont quelques exemples. La réalité virtuelle (Bernard, 2005), (Ma *et al.*, 2004), (Pouliquen *et al.*, 2007) permet aussi de visualiser et de simuler par exemple les opérations de maintenance ou d'effectuer des analyses ergonomiques (Bernard, *et al.*, 2007). On trouve aussi quelques logiciels autonomes, non intégrés à la CAO, qui permettent de prédire la maintenabilité et d'autres caractéristiques comme la fiabilité d'un système en phase de conception. Parmi ces logiciels, on peut citer : *Relax Reliability Studio* développé par Relex Software Corporation; *Item Toolkit* développé par Item Software; *λPREDICT* développé par Reliasoft ou *217plus* développé par RIAC (Reliability Information Analysis Center).

Comme complément à ces travaux, nous proposons, au chapitre 3 de cette thèse, une modélisation du processus générique de validation d'une exigence comportementale exprimée à l'aide d'un indicateur quantitatif. Cette modélisation a pour vocation d'ouvrir la voie au développement d'un module de validation des exigences comportementales à intégrer dans les systèmes CAO. Une application de ce modèle sur la validation de la maintenabilité et de la disponibilité, exprimées respectivement en termes de MTTR (*Mean Time To Repair*), que nous approximons avec la Moyenne des Temps Techniques de Réparation, et de la disponibilité stationnaire UTR (*Up Time Ratio*), est présentée en détail. Au chapitre 4, une méthodologie est proposée pour évaluer et optimiser le temps de démontage des composants au stade de la conception.

## 2.5 Quelques rappels sur la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité

### 2.5.1 Fiabilité, $R(t)$

#### 2.5.1.1 Définitions

La fiabilité est une «caractéristique d'un système, exprimée par la probabilité qu'il accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données et pendant une durée donnée». (Ait-Kadi, 2007)

$$0 \leq R(t) \leq 1 \quad (2.1)$$

Un système qui ne peut pas remplir sa fonction est dit défaillant ou en panne.

Ait-Kadi (2007) définit une **défaillance** comme étant la «cessation d'une entité à accomplir la fonction pour laquelle elle a été conçue». Une entité est déclarée défaillante lorsque ses caractéristiques sortent des tolérances définies lors de la conception ou lorsqu'elle ne satisfait pas à une ou plusieurs attentes du client. Chaque défaillance est caractérisée par l'effet par lequel elle est observée (mode de défaillance) et la cause qui la provoque (cause de défaillance).

#### 2.5.1.2 Notion de durée de vie

Lorsqu'un système en état de fonctionnement est mis en service à un instant  $t=0$ , il va rester dans cet état jusqu'à un instant aléatoire  $t=T$  où une défaillance va survenir et le mettre à l'arrêt. L'intervalle de temps  $[0, T]$ , de durée  $T$ , constitue alors la **durée de vie** du système, représentée sur la figure 2.3.

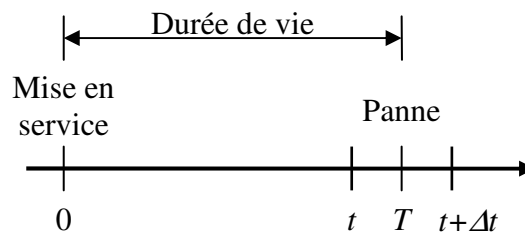


Figure 2.3 Durée de vie d'un système

La durée de vie du système,  $T$ , est une mesure de la quantité de service rendue. Elle est généralement mesurée par le nombre d'heures de fonctionnement effectif. Dans le cas d'un système qui s'use même à l'arrêt, par exemple la batterie, l'âge auquel il tombe en panne peut être considéré comme sa durée de vie.

La durée de vie d'un système est une variable aléatoire non négative caractérisée par une loi de probabilité qui peut être complètement connue, partiellement connue ou totalement inconnue. Parmi les principales lois de probabilité souvent utilisées pour caractériser les durées de vie, on note : la loi Exponentielle; la loi de Weibull; la loi de Poisson; la loi Normale; la loi Log-normale ou la loi Binomiale.

### 2.5.1.3 Caractéristiques de fiabilité

#### 2.5.1.3.1 Densité de probabilité de la durée de vie, $f(t)$

Elle représente la probabilité de défaillance par unité temps.

La probabilité que la durée de vie du système soit comprise entre  $t$  et  $t+\Delta t$  ou la probabilité que le système tombe en panne entre  $t$  et  $t+\Delta t$  est  $f(t)\Delta t$ , calculé par l'expression (2.2)

$$f(t)\Delta t = P[t < T \leq t + \Delta t] \quad (2.2)$$

Comme toute densité de probabilité, on a :

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (2.3)$$

#### 2.5.1.3.2 Fiabilité à l'instant $t$ , $R(t)$

C'est la probabilité que le système soit en vie à l'instant  $t$ , ou bien;

La probabilité de survie du système à l'instant  $t$ , ou encore;

La probabilité que la durée de vie,  $T$ , du système soit supérieure à  $t$ .

$$R(t) = P[T > t] = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

### 2.5.1.3.3 Distribution cumulative des durées de vie, $F(t)$

Il s'agit de la probabilité que le système soit en panne à l'instant  $t$ . Ou encore, la probabilité de défaillance du système à  $T \leq t$  (probabilité que la durée de vie,  $T$ , soit inférieure ou égale à  $t$ ).

$$F(t) = P[T \leq t] = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (2.5)$$

En additionnant les expressions (2.4) et (2.5), et, d'après (2.3) on obtient la relation (2.6).

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (2.6)$$

### 2.5.1.3.4 Taux de panne, $r(t)$

C'est la probabilité conditionnelle de défaillance par unité de temps d'un système ayant survécu jusqu'à  $t$ .

$$r(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[T \leq t + \Delta t | T > t]}{\Delta t} \quad (2.6)$$

$r(t)\Delta t \equiv$  probabilité que le système tombe en panne à  $T \leq t + \Delta t$  (donc, soit en panne à  $t + \Delta t$ ) sachant qu'il a survécu à  $t$ .

La loi de dégradation d'un système est complètement définie par la connaissance d'une des quatre caractéristiques  $f(t)$ ,  $R(t)$ ,  $F(t)$  ou  $r(t)$ . Le tableau 2.1 présente les relations entre ces caractéristiques (Lewis, 1994), (Ebeling, 1997), (Salvendy, 2001), (Nachlas, 2005).

Tableau 2.1 Relations entre les quatre caractéristiques de fiabilité

$f(t)$ connu	$F(t)$ connu	$R(t)$ connu	$r(t)$ connu
$R(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau$	$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$	$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt}$	$f(t) = r(t) \exp\left[-\int_0^t r(\tau) d\tau\right]$
$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau$	$R(t) = 1 - F(t)$	$F(t) = 1 - R(t)$	$R(t) = \exp\left[-\int_0^t r(\tau) d\tau\right]$
$r(t) = \frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(\tau) d\tau}$	$r(t) = \frac{1}{1 - F(t)} \frac{dF(t)}{dt}$	$r(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$	$F(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t r(\tau) d\tau\right]$

Dans le cas par exemple où la distribution des durées de vie est connue et suit une loi exponentielle, avec un taux de panne  $\lambda$  constant,  $f(t)$  est donné par l'expression (2.7).

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (2.7)$$

Les trois autres caractéristiques sont alors obtenues par les expressions (2.8), (2.9) et (2.10).

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (2.8)$$

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (2.9)$$

$$r(t) = \lambda \quad (2.10)$$

#### 2.5.1.4 Indicateurs de fiabilité

Plusieurs indicateurs sont utilisés pour estimer le niveau de fiabilité d'un système (IEC 61703, 2001), (Military Handbook – 217F, 1991), (Ireson *et al.*, 1995). Le choix d'un indicateur dépend de plusieurs facteurs tels que la nature du système (réparable ou non réparable) et l'utilisation prévue. Quelques uns sont présentés ci-dessous.

##### 2.5.1.4.1 Le taux de panne

Le taux de panne est l'un des indicateurs de fiabilité les plus utilisés. Il évolue dans le temps, pour un système donné. La figure 2.3 présente cette évolution. Elle comporte trois phases: la phase de mortalité infantile où le taux de panne est décroissant. Il s'agit de la

phase de rodage du système; la phase de la vie active où les défaillances sont aléatoires avec un taux de panne constant et la phase de vieillissement dont le taux de panne est croissant. La figure 2.4 présente ces trois phases et indique quelques causes de défaillance dans chaque phase et les quelques «remèdes» pour les corriger. L'allure de la courbe peut changer selon le type de produit : électronique, informatique ou mécanique. Lewis (1994) présente l'allure correspondant à chaque type de produit (figure 2.5).

Les taux de pannes sont généralement estimés à partir des historiques de pannes, du retour d'expérience, des essais accélérés, des avis d'expert, etc. Pour analyser les données souvent très nombreuses afin d'en déduire les taux de pannes ou d'autres caractéristiques de fiabilité, plusieurs outils informatiques (logiciels) sont disponibles sur le marché : Weibull++<sup>®</sup>, StatFit<sup>®</sup>, ExperFit<sup>®</sup>, etc.

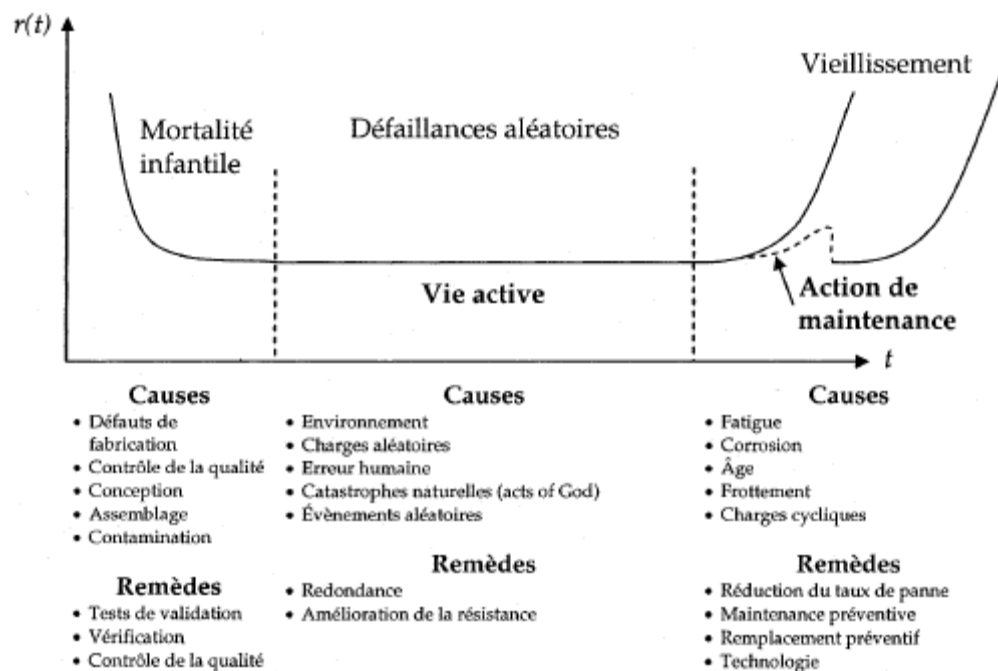


Figure 2.4 Évolution du taux de panne (courbe en baignoire)

Source : (Ait-Kadi, 2007)



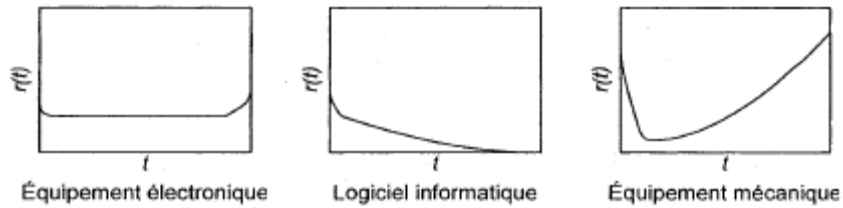


Figure 2.5 Allure des courbes de taux de pannes

Source : (Lewis, 1994)

#### 2.5.1.4.2 Autres indicateurs de fiabilité

Une famille d'indicateurs de mesure de la fiabilité est bâtie autour des temps de fonctionnement du système. Parmi les indicateurs de cette famille, on peut citer :

- Le *Mean Time Between Failure*, *MTBF* (qui est approximé par la Moyenne des Temps de Bon fonctionnement si les temps de réparation sont négligeables),

$$MTBF = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (2.11)$$

Lorsque la distribution des durées de vie suit une loi exponentielle (taux de panne constant  $\lambda$ ), on a :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.12)$$

- Le *temps moyen de fonctionnement avant défaillance*, *MTTF*. Cet indicateur se calcule de la même manière que le MTBF, mais est utilisé pour les systèmes non réparables.
- La *durée de vie utile*;

Différents d'outils d'analyse permettent d'estimer la fiabilité d'un système. Parmi ces outils, on note les arbres de défaillance, le bloc-diagramme de fiabilité, l'AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et leurs Effets) et l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, leurs Effets et leur Criticité).

Plusieurs secteurs d'activités, par exemple les secteurs pétrolier et nucléaire, et de nombreuses entreprises comme EDF (Électricité de France) et BELL disposent des bases de données de fiabilités des équipements qu'ils utilisent (Smith, 2005), (Military Handbook – 217F, 1991). Certaines de ces bases de données sont présentées à la section 3.2.2. Elles peuvent être mises à contribution pour estimer la fiabilité d'un système lorsqu'aucun historique de vie n'est disponible. C'est souvent le cas en phase de conception.

## 2.5.2 Maintenabilité

### 2.5.2.1 Définition

Pour une entité donnée, utilisée dans des conditions données d'utilisation, la **maintenabilité** est la probabilité pour qu'une opération donnée de maintenance active puisse être effectuée pendant un intervalle de temps donné, lorsque la maintenance est assurée dans des conditions données et avec l'utilisation de procédures et de moyens prescrits». (IEC 60050-191, 1990), (ARMP-7, 2001).

Une autre définition, complémentaire, fournie par le Military HandBook – 470A (1997) est la suivante : la **maintenabilité** est la relative facilité et économie de temps et de ressources avec laquelle un système peut être maintenue ou remis dans un état de fonctionnement spécifique, lorsque la maintenance est exécutée par un personnel ayant les compétences requises et utilisant les procédures et les ressources matérielles prescrites, à chaque niveau de maintenance spécifié.

Cette dernière définition indique que la maintenabilité est une caractéristique ou aptitude d'un système et que sa mesure se base essentiellement sur l'appréciation du déroulement des activités de maintenance. La **maintenance** désigne l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un système dans un état spécifié ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise (Ait-Kadi *et al.*, 2004).

Comme la durée de vie pour la fiabilité, la durée de réparation lors de la maintenance d'un système est une variable aléatoire dont la distribution cumulative est donnée par l'expression (2.13).

$$H(t) = \int_0^t h(x) dx \quad (2.13)$$

Où  $h(t)$  la fonction densité de probabilité de réparation

La moyenne des temps de réparation, MTTR, qui est une des principales mesures de la maintenabilité, est calculée à partir de l'expression (2.14).

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \cdot h(t) dt \quad (2.14)$$

Si les durées de réparation suivent une loi exponentielle avec un taux de réparation constant,  $\mu$ , on a :

$$h(t) = \mu \exp(-\mu t) \quad (2.15)$$

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (2.16)$$

### 2.5.2.2 Critères de maintenabilité

Plusieurs critères doivent être pris en compte lors de la conception d'un système pour que sa maintenance soit facile, rapide et économe en ressources. Ces critères sont généralement classés en deux groupes : les critères intrinsèques qui sont inhérent au système et les critères contextuels qui sont relatifs au contexte d'utilisation.

#### 2.5.2.2.1 Critères intrinsèques

Parmi les principaux critères intrinsèques que confèrent à un système un bon niveau de maintenabilité, on peut citer : la démontabilité; l'accessibilité; l'interchangeabilité; la standardisation; la modularisation; la simplicité; la testabilité; etc. (Military Handbook – 470A, 1997), (Ireson *et al.*, 1995). Ces critères doivent être pris en compte dès la conception du système.

### 2.5.2.2.2 Critères contextuels

Certains éléments caractéristiques du contexte d'utilisation d'un système peuvent avoir une influence majeure sur sa maintenabilité. Ces éléments peuvent être classés en quatre groupes : les ressources humaines, les ressources matérielles, l'organisation mise en place et les conditions environnementales. Le tableau 2.2 fait une synthèse des principaux critères contextuels et les facteurs qui les caractérisent.

### 2.5.2.3 Indicateurs de maintenabilité.

Plusieurs indicateurs de maintenabilité sont disponibles dans la littérature. Ils sont de différentes natures. Certains mesurent par exemple les durées des activités de maintenance. Parmi eux, il y a la Moyenne des Temps Techniques de Réparation,  $MTTR$ , qui est un des indicateurs de maintenabilité les plus utilisés.

Pour un système série de  $N$  composants dont les taux de pannes sont constants, le  $MTTR_s$  du système est obtenu par l'équation (2.15).

$$MTTR_s = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i MTTR_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \quad (2.15)$$

Où  $\lambda_i$  est le taux de panne du composant  $i$  et  $MTTR_i$  la moyenne des temps technique de réparation du composant  $i$ . Elle est égale à la somme des durées des étapes (diagnostic, démontage, interchange, remontage, vérification du bonfonctionnement) de la phase active de maintenance corrective du composant  $i$

On trouve aussi des indicateurs de fréquence des activités de maintenance ou encore des indicateurs de coût des ces mêmes activités de maintenance. Les principaux indicateurs disponibles sont analysés au chapitre 3 en vue de déterminer ceux qui peuvent être utilisés en conception pour la validation de la maintenabilité.

## 2.5.3 Disponibilité

### 2.5.3.1 Définitions

La norme IEC 50-191 (1990) définit la **disponibilité** comme étant la «probabilité pour que l'équipement ou le système utilisé dans les conditions prévues soit en état d'accomplir une fonction requise à un instant donné».

Une autre définition similaire est proposée par Ait-Kadi (2007) qui définit la *disponibilité instantanée* comme «la probabilité que le système soit en état d'opération à un instant  $t$  et ce, indépendamment des états précédents».

Si les durées de vie et les durées de réparation suivent une distribution exponentielle avec, respectivement, un taux de panne  $\lambda$  et un taux de réparation  $\mu$ , tous constants, la disponibilité instantanée est donnée par l'expression (2.16).

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp(-(\lambda + \mu)t) \quad (2.16)$$

### 2.5.3.2 Indicateurs de disponibilité

Les principaux indicateurs de disponibilité rencontrés dans la littérature sont analysés à la section 3.2.2 du chapitre 3, pour déterminer ceux qui peuvent être évalués en conception. Il s'agit essentiellement des expressions de disponibilité en régime permanent. Ils correspondent à la proportion de temps où le système est en état de fonctionnement par rapport au temps total (IEC 60300-3-4, 2007).

$$Disponibilité = \frac{Temps\ de\ fonctionnement}{Temps\ de\ fonctionnement + Temps\ d'arrêt}$$

La différence entre ces indicateurs réside sur les éléments qu'on inclut dans le temps d'arrêt. Par exemple, lorsque le temps de maintenance corrective est la seule composante du temps d'arrêt, on obtient la disponibilité stationnaire ou *Up Time Ratio*, *UTR*, donné par l'expression (2.17). Si les délais administratifs, les délais logistiques, le temps de maintenance préventive et le temps de maintenance corrective sont tous pris en compte, on obtient la disponibilité opérationnelle donnée par l'expression (2.18).

- *Disponibilité stationnaire*

$$UTR = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.17)$$

- *Disponibilité opérationnelle*

$$A_0 = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (2.18)$$

Où *MTBM* (Mean Time Between Maintenance) est le temps moyen entre les actions de maintenance et *MDT* (Mean Down Time) est la moyenne de des temps d'arrêts (administratifs, logistiques et maintenance).

## 2.6 Allocation de fiabilité et de maintenabilité

### 2.6.1 Définition

L'**allocation** de fiabilité est le processus qui permet de traduire les exigences de fiabilité du système en exigences de fiabilité des composants (Military Handbook – 338B, 1998).

### 2.6.2 Méthodes d'allocation de fiabilité

Plusieurs méthodes d'allocation de fiabilité sont proposées dans la littérature (Ebeling, 1997), (Kececioglu, 1991), (Military Handbook – 338B, 1998). Quelques unes sont présentées ci-dessous:

#### 2.6.2.1 Allocation équitable :

Cette méthode attribue la même importance aux composants et leur attribue une même exigence de fiabilité. Pour un système série de  $N$  composants dont les taux de pannes sont constants, l'allocation équitable conduit à :

$$R_i^* = \sqrt[N]{R_s^*} \quad (2.19)$$

Ou bien

$$\lambda_i^* = \frac{\lambda_s^*}{N} \quad (2.20)$$

Où  $R_s^*$  et  $R_i^*$  (ou  $\lambda_s^*$  et  $\lambda_i^*$ ) sont respectivement l'exigence de fiabilité (ou de taux de panne) du système et l'exigence alloué au composant  $i$ .

### 2.6.2.2 Méthode ARINC

Cette méthode a été proposée par Aeronautical Research Inc. Elle suppose que les composants sont indépendants, en série et ont un taux de panne constant.

$$\lambda_i^* = w_i \lambda_s^* \quad (2.21)$$

Avec

$$w_i = \frac{\lambda_{i0}}{\sum_{j=1}^N \lambda_{j0}} \quad (2.22)$$

$\lambda_{i0}$  : taux de panne initial du composant  $i$ .  $\lambda_{i0}$  peut être obtenu par exemple à partir des bases de données.

Chaque composant se voit allouer une exigence de taux de panne proportionnel à son taux de panne initial.

### 2.6.2.3 Méthode Boyd

Cette méthode a été proposée par Boyd (Boyd, 1992). Elle combine l'allocation équitable et la méthode ARINC en introduisant deux facteurs  $K$  et  $M$ .

$$\lambda_i^* = M \lambda_s^* ((K/N) + (1-K)w_i) \quad (2.23)$$

Où :

$K$  est un facteur compris entre 0 (allocation équitable) et 1 (Méthode ARINC).

$M = (1 - \alpha)$ ,  $\alpha$  étant la marge de sécurité désirée (en pourcentage)

#### 2.6.2.4 Autres méthodes d'allocation de fiabilité

D'autres méthodes peuvent être consultées dans (Military Handbook – 338B, 1998), (Kececioglu, 1991) : *Méthode AGREE* (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment); *la Méthode Feasibility-Of-Objectives Technique, l'algorithme de minimisation des efforts ou la méthode Karmiol*).

#### 2.6.2.5 Allocation optimale de fiabilité

Le problème d'allocation de fiabilité peut aussi être traité comme un problème de sélection des composants, dont la fiabilité est connue, pour satisfaire une exigence globale de fiabilité du système. Ces problèmes sont connus sous le nom d'allocation optimale (Subba *et al.*, 1999). Ils peuvent être formulés de l'une des manières suivantes :

- Minimiser le coût du système en respectant une contrainte de fiabilité :  $Minimiser C_s$   
 $R_s \geq R_s^*$
- Maximiser la fiabilité sous une contrainte de coût :  $Maximiser R_s$   
 $C_s \leq C_{max}$
- Optimisation multi objectifs :  $Minimiser \begin{pmatrix} C_s \\ 1 - R_s \end{pmatrix}$

Par exemple, on considère une solution ayant  $N$  composants en série. On suppose que, pour chaque composant  $i$ , le concepteur doit effectuer un choix parmi plusieurs modèles disponibles. Chaque modèle  $j$  du composant  $i$  est caractérisé par sa fiabilité  $R_{ij}$  (ou son taux de panne  $\lambda_{ij}$ ) et son coût  $c_{ij}$ . Le problème peut alors être formulé de deux manières, en utilisant les variables binaires,  $Y_{ij}$ , qui prennent la valeur 1 si le modèle  $j$  du composant  $i$  est choisit et 0 sinon. Avec  $n_i$  : le nombre de modèles disponibles du composant  $i$  et  $N$  le nombre de composants du système.



- Si la solution doit satisfaire un niveau de fiabilité  $R^*$  (ou un taux de panne  $\lambda^*$ ), tout en minimisant le coût des composants, alors, le modèle suivant peut être utilisé pour déterminer le choix optimal des composants :

$$\text{Min}Z = \sum_i^N \sum_j^{n_i} c_{ij} Y_{ij} \quad (2.24)$$

Sujet à :

$$\prod_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^{n_i} R_{ij} Y_{ij} \right) \geq R^* \quad \text{ou} \quad \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{ij} Y_{ij} \right) \leq \lambda^* \quad (2.25)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij} = 1 \quad (2.26)$$

$$Y_{ij} = 0 \quad \text{ou} \quad 1 \quad (2.27)$$

- Si par contre, la fiabilité de la solution doit être maximisée, sans dépasser un coût de revient  $C^*$ , alors le modèle d'allocation optimale de fiabilité devient :

$$\text{Max}Z = \prod_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^{n_i} R_{ij} Y_{ij} \right) \quad \text{ou} \quad \text{Min}Z = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{ij} Y_{ij} \right) \quad (2.28)$$

Sujet à :

$$\sum_i^N \sum_j^{n_i} c_{ij} Y_{ij} \leq C^* \quad (2.29)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij} = 1 \quad (2.26)$$

$$Y_{ij} = 0 \quad \text{ou} \quad 1 \quad (2.27)$$

### 2.6.3 Allocation de maintenabilité

Comme pour la fiabilité, des méthodes sont disponibles dans la littérature pour traduire les exigences globales de maintenabilité du système en exigences de maintenabilité des composants (Military Handbook – 470A, 1997), (IEC 60706-2, 2006), (Chipchak, 1970), (Arsenault and Roberts, 1980). L'exigence globale de maintenabilité du système est généralement exprimée sous forme d'un seuil  $MTTR_s^*$ . L'exigence de maintenabilité allouée au composant  $i$ ,  $MTTR_i^*$ , peut alors être déterminée par l'une des méthodes ci-dessous.

#### 2.6.3.1 Allocation équitable

L'allocation équitable est applicable lorsque tous les composants ont le même taux de panne  $\lambda_i = \lambda$  (le taux de panne du système est alors  $\lambda_s = \sum_{i=1}^N \lambda_i = N\lambda$ ). Tous les composants doivent alors avoir le même  $MTTR_i^*$  égal à l'exigence  $MTTR_s^*$ , d'après l'expression (2.15).

$$MTTR_i^* = MTTR_s^* \quad (2.28)$$

#### 2.6.3.2 Allocation par pondération

Cette méthode alloue les  $MTTR_i^*$  par pondération. Les coefficients de pondération sont des proportions de taux de panne des composants par rapport au taux de panne du système.

$$MTTR_i^* = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} MTTR_s^* \quad (2.29)$$

#### 2.6.3.3 Méthode de complexité du taux de panne

L'allocation est effectuée proportionnellement au taux de panne des composants. Le produit  $\lambda_i MTTR_i^*$  doit être le même pour tous les composants. Ce produit représente le coefficient de proportionnalité. Partant de l'expression (2.15), deux cas peuvent être distingués :

- Dans le cas d'une solution nouvelle, les seuils  $MTTR_i^*$  sont obtenus par l'expression (2.30).

$$MTTR_i^* = \frac{\sum_{j=1}^N \lambda_j}{\lambda_i N} MTTR_s^* \quad (2.30)$$

- Dans le cas d'une conception partiellement nouvelle, on suppose qu'on connaît le  $MTTR_j$  de  $l$  des  $N$  composants ( $l < N$ ), les  $MTTR_i^*$  des  $N-l$  composants nouveaux sont obtenus par l'expression (2.31).

$$MTTR_i^* = \frac{\left( \sum_{k=1}^N \lambda_k \right) MTTR_s^* - \sum_{j=1}^l \lambda_j MTTR_j}{(N-l)\lambda_i} \quad (2.31)$$

#### 2.6.3.4 Méthode d'Arsenault & Roberts

Cette méthode, présentée dans (Arsenault and Roberts, 1980), permet de tenir compte des critères intrinsèques de maintenabilité.

$$MTTR_i^* = \frac{K_i}{K} MTTR_s^* \quad (2.32)$$

Avec  $K = \frac{\sum_{i=1}^N K_i \lambda_i}{\lambda_s}$  et  $K_i = \frac{K_{A_i} + K_{C_i} + K_{D_i} + K_{E_i} + K_{M_i} + K_{P_i}}{6}$

$K_{A_i}$  : accessibilité;                       $K_{C_i}$  : complexité;                       $K_{D_i}$  : détectabilité ;

$K_{E_i}$  : environnement;                       $K_{M_i}$  : manipulation;                       $K_{P_i}$  : pose/dépose.

#### 2.6.3.5 Autres méthodes

Une méthode statistique est présentée dans l'annexe A de la norme IEC 60706-2 (2006). Cette méthode suppose une distribution log-norme des durées de réparation. D'autres

méthodes utilisant la disponibilité permettent de faire un compromis entre la fiabilité et la maintenabilité (O'Connor, 2002).

## **2.7 Prise en compte du contexte d'exploitation du système**

### **2.7.1 Facteurs contextuels influençant la disponibilité, la fiabilité et la maintenabilité**

Les caractéristiques annoncées d'un système à la sortie de la phase de conception ne sont pas toujours celles observées dans sa phase d'exploitation. La différence est due à l'influence des facteurs qui caractérisent le contexte d'exploitation (Dhillon, 1999), (Ramakumar *et al.*, 2000), (Dhillon, 2002), (Ireson *et al.*, 1995), (DoD, 2005), (Military Handbook – 338B, 1998), (Military Handbook – 502, 1997). Le tableau 2.2 présente une synthèse de ces critères.

### **2.7.2 Évaluation de l'impacte des facteurs contextuels sur la sûreté de fonctionnement**

Plusieurs travaux, notamment dans le domaine militaire et aérospatial, étudient l'impact du contexte d'utilisation sur le système. Ces travaux portent essentiellement sur les conditions environnementales et le facteur humain (Military Standard – 1472F, 1999), (Military Standard – 810F, 2000), (NSWC-07, 2007), (Military Handbook – 310, 1997), (NASA-STD-3000, 1994), (NASA-STD-3000, 1995), (NASA/TM-2006-214535).

### **2.7.3 Prise en compte du contexte d'exploitation en conception**

Pour diminuer les écarts souvent observés entre les performances annoncées et les performances réelles du système dans son contexte d'utilisation, le concepteur doit tenir compte des caractéristiques de ce contexte. Pour ce faire, il peut procéder de deux manières différentes. La première est d'adapter le système à son contexte. La deuxième est de définir les recommandations à mettre en place dans le contexte d'utilisation.

Tableau 2.2 Critères contextuels

	Critères contextuels	Facteurs
Ressources humaines	Équipe de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effectif</li> <li>• Compétences</li> <li>• Disponibilités</li> <li>• Coût (salaire, embauche, licenciement, ...)</li> </ul>
Ressources matérielles	Équipement support	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantité</li> <li>• Disponibilité</li> <li>• Coût (achat, réparation, exploitation, ...)</li> </ul>
	Documentation technique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité</li> <li>• Mis à jours</li> </ul>
	Pièces de rechange	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité</li> <li>• Délai d'approvisionnement</li> <li>• Coût (achat, transport, stockage, pénurie...)</li> </ul>
Environnement organisationnel	Procédures administratives	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre de niveaux de décision</li> <li>• Quantité de documents à remplir</li> <li>• Etc.</li> </ul>
	Organisation et gestion de la maintenance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Éloignement des ateliers de réparation</li> <li>• Politiques de maintenance</li> <li>• Sous-traitance</li> <li>• Etc.</li> </ul>
Environnement physique	Conditions environnementales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Température</li> <li>• Humidité</li> <li>• précipitation (pluie, neige, etc.)</li> <li>• Composition de l'air</li> <li>• Radiation</li> <li>• Champs électromagnétique</li> <li>• Vibrations</li> <li>• Chocs</li> <li>• Situation géographique</li> <li>• Saison</li> <li>• luminosité</li> <li>• Etc.</li> </ul>

Pour adapter le système à son contexte d'exploitation, le concepteur doit connaître l'effet de chaque facteur d'influence de contexte et définir le système de telle sorte qu'il soit résistant à cet effet. Par exemple, utiliser des matériaux résistants au climat du lieu d'utilisation, utiliser les technologies dont la maintenance peut être exécutée sur place, intégrer les composants dont les pièces de rechange sont disponibles sur place,

dimensionner les composants pour qu'il soit plus résistants aux chocs, etc. Le concepteur peut se baser sur certains travaux pour atteindre ce but (NSWC-07, 2007), (Military Standard – 810F, 2000).

Concernant la deuxième solution, le concepteur va définir les recommandations à mettre en place dans le contexte d'exploitation pour que les performances attendues soit effectivement atteintes. Les recommandations peuvent porter par exemple sur l'outillage à acquérir, sur les politiques de maintenance à adopter, sur le niveau de stocks de pièces de rechanges à tenir par composant, sur le nombre et les compétences des opérateurs de maintenance, etc. Pour faire ces recommandations, le concepteur doit disposer des outils adéquats. Une contribution allant dans ce sens est présentée au chapitre 6. Il s'agit d'une méthodologie permettant au concepteur de définir des recommandations sur le nombre et les compétences des opérateurs de l'équipe de maintenance du système.

#### **2.7.4 Estimation des ressources humaines**

Dans la littérature, plusieurs travaux abordent la problématique de constitution d'équipes dans des domaines comme la gestion de la production, la gestion de projet ou la conception de produits. Un état de l'art sur la constitution d'équipe de conception est présenté dans (Bonjour, 2008). De nombreux ouvrages présentent des méthodes de calcul des effectifs lors de la planification des capacités en gestion de projets et en gestion et organisation de la production. Parmi ces ouvrages, on compte (Stevenson, 2006), (Javel, 2003), (Salvendy, 2001) ou (Dilworth, 1993). Certaines de ces références présentent aussi des modèles de calcul du nombre d'opérateurs ou serveurs pour des problèmes modélisés par des files d'attente. D'autres travaux dans la littérature traitent de la sélection du personnel, par exemples (De Korvin *et al.*, 2002), (Groneau *et al.*, 2007), (Tsai *et al.*, 2003), (Acuna et Juristo, 2004), (Chen S.J et Lin, 2004), (Hadj-Hamou et Caillaud, 2004) ou (Fitzpatrick et Askin, 2005). Mais, tous ces travaux sur la sélection du personnel se situent en aval de la phase de détermination des compétences et du nombre de personnes devant constituer une équipe. De façon générale, il ressort que peu de travaux traitent de la détermination des compétences et du nombre d'opérateurs devant constituer une équipe, et particulièrement dans le domaine de la maintenance d'un système en exploitation.

Au chapitre 6, nous proposons une méthodologie permettant au concepteur de définir les recommandations en termes de nombres et compétences des opérateurs de l'équipe de maintenance à mettre en place dans le futur contexte d'utilisation du système.

## **2.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux concepts et les principales notions utilisées dans cette thèse. Nous avons aussi présenté les récents travaux disponibles dans la littérature et qui traitent des concepts présentés. Les chapitres qui suivent présentent les contributions qu'apporte la thèse. La première, que présente le chapitre 3, est l'analyse des indicateurs de maintenabilité et de disponibilité pour déterminer ceux qui peuvent être utilisés en phase de conception.

# Chapitre 3 Indicateurs de maintenabilité et de disponibilité en conception

## 3.1 Introduction

Pour valider une caractéristique ou une performance, il faut disposer d'un indicateur. Ce chapitre a pour but de rechercher les indicateurs de maintenabilité et de disponibilité pouvant être évalués en phase de conception. La recherche est effectuée parmi les indicateurs disponibles dans la littérature. Ces indicateurs sont essentiellement utilisés en exploitation. La méthodologie adoptée est la suivante :

- recenser les principaux indicateurs disponibles;
- identifier les paramètres permettant de les calculer;
- identifier les sources d'obtentions des données permettant d'évaluer ces paramètres;
- Identifier les sources d'obtention des données qui peuvent être exploitées en conception, et;
- Dédire les indicateurs pouvant être évalués en conception.

La suite du chapitre comporte trois sections. Les deux premières, les sections 3.2 et 3.3, sont consacrées à l'application de la méthodologie présentée pour trouver, respectivement, le(s) indicateur(s) de maintenabilité et le(s) indicateur(s) de disponibilité pouvant être évalué(s) en conception. La section 3.4, la dernière, présente une conclusion.

Pour la présentation des indicateurs et leurs paramètres, nous adoptons les annotations suivantes :

- $N$  : Nombre de composants du système;
- $M$  : Nombre d'activités préventives à exécuter sur le système ;
- $\lambda_i$  : Taux de panne du composant  $i$ ;
- $f_i$  : Fréquence de l'activité préventive  $j$ ;
- $\lambda$  : Taux de panne du système;



$f$	: Taux d'activités de maintenance préventive du système;
$Nc_i$	: Nombre d'opérateurs affectés à l'activité corrective du composant i;
$Np_j$	: Nombre d'opérateurs affectés à l'activité préventive j;
$tc_k$	: Durée de l'étape k de l'exécution de l'activité;
$Mct_i$	: Temps de maintenance corrective du composant i;
$Mpt_j$	: Temps d'exécution de l'activité préventive j;
$\overline{Mct}$	: Moyenne des temps de maintenance corrective;
$\overline{Mpt}$	: Moyenne des temps de maintenance préventive;
$\overline{M}$	: Moyenne des temps actifs de maintenance ;
$\tilde{Mct}$	: Médiane des temps de maintenance corrective ;
$\tilde{Mpt}$	: Médiane des temps de maintenance préventive ;
$Mct_{max}$	: Maximum de temps de maintenance corrective;
$Mpt_{max}$	: Maximum de temps de maintenance préventive;
$LDTc_i$	: Temps logistique de l'activité corrective du composant i;
$LDTp_j$	: Temps logistique de l'activité préventive j;
$\overline{LDTc}$	: Temps logistique moyen des activités correctives ;
$\overline{LDTp}$	: Temps logistique moyen des activités préventives;
$\overline{LDT}$	: Moyenne des temps logistiques;
$ADTc_i$	: Temps administratif de l'activité corrective du composant i;
$ADTp_j$	: Temps administratif de l'activité préventive j;
$\overline{ADTc}$	: Temps administratif moyen des activités correctives ;
$\overline{ADTp}$	: Temps administratif moyen des activités préventives;
$\overline{ADT}$	: Moyenne des Temps administratifs;
$MDTc$	: Temps d'arrêt moyen pour maintenance corrective;
$MDTp$	: Temps d'arrêt moyen pour maintenance préventive ;
$MDT$	: Moyenne des temps d'arrêt du système;
$MTBM$	: Temps moyen entre les actions de maintenance;

$MLHc/OH$	: Temps de main d'œuvre des activités correctives par heure de ;fonctionnement
$MLHp/OH$	: Temps de main d'œuvre des activités préventives par heure de fonctionnement ;
$MLH/OH$	: Temps de main d'œuvre de maintenance par heure de fonctionnement ;
$MLHc/MA$	: Temps moyen de main d'œuvre par activité corrective ;
$MLHp/MA$	: Temps moyen de main d'œuvre par activité préventive;
$MLH/MA$	: Temps moyen de main d'œuvre par activité de maintenance;
$MCc_i$	: Coût de l'activité corrective sur le composant i;
$MCp_j$	: Coût de l'activité préventive j;
$MCc/OH$	: Coût moyen des activités correctives par heure de fonctionnement;
$MCp/OH$	: Coût moyen des activités préventive par heure de fonctionnement ;
$MC/OH$	: Coût moyen des activités par heure de fonctionnement;
$MCc/MA$	: Coût moyen par activité corrective;
$MCp/MA$	: Coût moyen par activité de préventive ;
$MC/MA$	: Coût moyen par activité de maintenance.

## 3.2 Indicateurs de maintenabilité en conception

Dans cette section, nous analysons les indicateurs de maintenabilité utilisés en exploitation pour identifier ceux pouvant être évalués en conception. Pour ce faire, nous recensons d'abord les indicateurs utilisés en exploitation et identifions les paramètres contenus dans leurs expressions. Nous examinons ensuite les sources d'obtention des données permettant d'évaluer ces paramètres. Certaines de ces sources de données peuvent être exploitées en conception. Leur identification nous permet de déduire les indicateurs pouvant être évalués en conception.

### 3.2.1 Indicateurs de maintenabilité en exploitation

La maintenabilité représente l'aptitude d'un système à être maintenu ou remis dans un état de fonctionnement spécifique, lorsque la maintenance est exécutée par un personnel ayant les compétences requises et utilisant les procédures et les ressources matérielles prescrites (Military HandBook – 470A, 1997). En d'autres termes, la maintenabilité représente la

facilité et la rapidité avec lesquelles un système peut être remis en état de fonctionnement après une défaillance. Plusieurs références dans la littérature présentent les critères qui confèrent à un système un bon niveau de maintenabilité (Dhillon, 1999), (Dhillon, 2002), (Ireson *et al.*, 1995), (Ebeling, 1997), (Military HandBook – 791, 1988) ou (norme NF X60-301, 1982). Ces critères sont de deux types : les critères inhérents au système lui-même (critères intrinsèques) et les critères inhérents au milieu d'exploitation du système (critères contextuels). Comme critères intrinsèques, on peut citer : l'accessibilité, la démontabilité, la standardisation ou encore l'interchangeabilité. Comme critères contextuels, on a : les ressources humaines (effectifs et qualifications), le matériel support disponible, la disponibilité des pièces de rechange, les conditions environnementales ou les stratégies de gestion des opérations de production et de maintenance.

Les services de maintenance font face à un défi quotidien : augmenter la disponibilité du système en diminuant la durée et la fréquence des activités de maintenance tout en respectant un budget alloué. Pour évaluer le niveau de maintenabilité du système et leur performance face à ce défi, plusieurs indicateurs sont disponibles dans la littérature (Ireson *et al.*, 1995), (Military HandBook – 470A, 1997) ou (Blanchard *et al.*, 2005). Ces indicateurs sont utilisés principalement en exploitation. Ils peuvent être regroupés en quatre familles (Menye *et al.*, 2007) que nous présentons ci-dessous. Chaque indicateur peut être évalué pour les activités de maintenance corrective, pour les activités de maintenance préventive ou simultanément pour les deux types d'activités de maintenance. Dans les sous-sections suivantes, nous présentons les expressions de ces indicateurs uniquement pour pouvoir identifier les paramètres qui interviennent dans leur calcul. Aucune référence à ces expressions n'est faite par la suite. C'est pour cette raison que nous avons choisi de présenter ces expressions dans des tableaux synthèses au lieu de les présenter individuellement à la ligne et avec des numéros.

### **3.2.1.1 Indicateurs de durée des activités de maintenance**

Les indicateurs de durée des activités de maintenance évaluent la durée des étapes actives du cycle de maintenance corrective ou préventive (tableau 3.1) : diagnostic (exclusivement pour la maintenance corrective), démontage, remplacement/réparation, remontage,

ajustement, vérification du bon fonctionnement et rodage (Military HandBook – 470A, 1997). Ces étapes sont dites « actives » car elles sont exécutées sur l'équipement. Par contre, la première étape, préparation, est dite « inactive », car durant son exécution, rien ne se passe sur le système qui est alors en attente de réparation. L'étape de préparation englobe toutes les opérations administratives et logistiques préalables à la phase active. Dans le cas d'une opération de maintenance préventive nécessitant l'arrêt de fonctionnement du système, l'étape de préparation peut être exécutée en temps masquée (pendant que le système est encore en fonctionnement) pour réduire le temps d'arrêt du système.

Les indicateurs de durée des activités de maintenance sont basés sur la durée des étapes de la phase active de maintenance. On va ainsi mesurer par exemple la moyenne, la médiane ou le maximum des temps actifs de maintenance préventive ou de maintenance corrective ou alors de maintenance préventive et corrective simultanément.

Tableau 3.1 Étapes du cycle de maintenance

		<b>Étapes</b>	<b>Maintenance corrective</b>	<b>Maintenance préventive</b>
		Préparation	x	x
<b>Phase active</b>		Diagnostic (localisation et isolation de la panne)*	x	
		Démontage du composant	x	x
		Remplacement ou réparation du composant	x	x
		Remontage du composant	x	x
		Vérification du bon fonctionnement	x	x

(\*) L'étape de localisation de la panne est exclusive à la maintenance corrective

Rappelons que la médiane représente la valeur qui permet de séparer une population ou une série en deux parties égales. En d'autres termes, la moitié des activités de maintenance a une durée individuelle inférieure à la médiane et l'autre moitié a une durée individuelle supérieure à la médiane (Dhillon, 2002) et (Blanchard *et al.*, 2005). Le maximum des temps de maintenance, quant à lui, correspond à la durée (individuelle) maximale d'un pourcentage donné (généralement 90% ou 95%) d'activités de maintenance (Ireson *et al.*

1995). Lorsqu'il s'agit de la médiane ou du maximum des temps actifs de maintenance, l'expression varie en fonction de la distribution des durées observées comme l'indique le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Indicateurs de durées de maintenance active

Indicateur		Maintenance corrective	Maintenance préventive
Moyenne de temps actifs		$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \times MTTR_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}$	$\overline{Mpt} = \frac{\sum_{j=1}^M f_j \times Mpt_j}{\sum_{j=1}^M f_j}$
		Maintenance corrective et préventive : $\overline{M} = \frac{(\lambda \times MTTR) + (f \times \overline{Mpt})}{\lambda + f}$	
Médiane des temps actifs	Distribution normale	$\tilde{Mct} = MTTR$	$\tilde{Mpt} = \overline{Mpt}$
	Distribution log normale	$\tilde{Mct} = \text{anti log} \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \times \log MTTR_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}$	$\tilde{Mpt} = \text{anti log} \frac{\sum_{j=1}^M f_j \times \log Mpt_j}{\sum_{j=1}^M f_j}$
	Distribution exponentielle	$\tilde{Mct} = 0.69 \times MTTR$	$\tilde{Mpt} = 0.69 \times \overline{Mpt}$
Maximum des temps actifs	Distribution normale	$Mct_{max} = MTTR + (z \times \sigma_{MTTR})$ $z = 1.28 \text{ ou } 1.65 \text{ pour } 90\% \text{ ou } 95\%$	$Mpt_{max} = \overline{Mpt} + (z \times \sigma_{\overline{Mpt}})$ $z = 1.28 \text{ ou } 1.65 \text{ pour } 90\% \text{ ou } 95\%$
	Distribution log-normale	$Mct_{max} = \text{anti log} (\overline{\log MTTR} + (z \times \sigma_{\log MTTR}))$	$Mpt_{max} = \text{anti log} (\overline{\log Mpt} + (z \times \sigma_{\log Mpt}))$
	Distribution exponentielle	$Mct_{max} = z_e \times MTTR$ $z_e = 2.312 \text{ ou } 3.00 \text{ pour } 90\% \text{ ou } 95\%$	$Mpt_{max} = z_e \times \overline{Mpt}$ $z_e = 2.312 \text{ ou } 3.00 \text{ pour } 90\% \text{ ou } 95\%$

La moyenne des temps techniques de réparation et la moyenne des temps de maintenance préventive d'un composant  $i$ , respectivement  $MTTR_i$  et  $Mct_i$  sont obtenues en additionnant les durées des étapes actives du processus de maintenance correspondant.

### 3.2.1.2 Indicateurs de fréquence des activités de maintenance,

Les indicateurs de fréquence indiquent le temps moyen qui s'écoule entre deux activités de maintenance corrective, deux activités de maintenance préventive ou bien deux activités de maintenance corrective et préventive. Les expressions correspondantes sont présentées au tableau 3.3.

Tableau 3.3 Indicateurs de fréquence des activités de maintenance

Indicateur	Maintenance corrective	Maintenance préventive
Temps moyen entre activités	$MTBF = \frac{1}{\lambda}$	$MTPM = \frac{1}{f}$
	$MTBM = \frac{1}{\lambda + f}$	

Dans le cas particulier d'un système série avec des taux de pannes constants, on a :

$$\lambda = \sum_i \lambda_i \text{ et } f = \sum_j f_j .$$

Un autre indicateur de fréquence couramment utilisé est le *Temps moyen entre remplacement*, *MTBR*. Cet indicateur est très important pour le dimensionnement des pièces de rechange. En effet, il permet de déterminer la fréquence de remplacement des composants, étant donné que certaines activités de maintenance corrective et préventive ne nécessitent pas de remplacement de composants.

### 3.2.1.3 Indicateurs de temps de main d'œuvre de maintenance

Dans cette catégorie, les indicateurs couramment rencontrés sont : le temps moyen de main d'œuvre par heure de fonctionnement, par activité de maintenance, par mission, par mois ou par an. Le premier peut être considéré comme l'indicateur principal (Blanchard *et al.*, 2005). Il permet en effet de calculer les autres indicateurs de la catégorie. Le tableau 3.4 présente les expressions pour le calcul du temps moyen de main d'œuvre par heure de fonctionnement et par activité de maintenance.

Tableau 3.4 Indicateurs de temps de main d'œuvre

Indicateur	Maintenance corrective	Maintenance préventive
Temps moyen de main d'œuvre par heure de fonctionnement	$MLHc / OH = \sum_{i=1}^N \lambda_i \times Mct_i \times Nc_i$	$MLHp / OH = \sum_{j=1}^M f_j \times Mpt_j \times Np_j$
	$MLH / OH = \frac{\lambda \times (MLHc / OH) + f \times (MLHp / OH)}{\lambda + f}$	
Temps moyen de main d'œuvre par activité	$MLHc / MA = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \times Mct_i \times Nc_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}$	$MLHp / MA = \frac{\sum_{j=1}^M f_j \times Mpt_j \times Np_j}{\sum_{j=1}^M f_j}$
	$MLH / MA = \frac{\lambda \times (MLHc / MA) + f \times (MLHp / MA)}{\lambda + f}$	

#### 3.2.1.4 Indicateurs de coût des activités de maintenance.

Les coûts de maintenance prennent en compte les éléments tels que la main d'œuvre (formation, salaire, etc.), les pièces de rechange (achat, transport, stockage, etc.), les équipements supports (amortissement, exploitation, etc.), les infrastructures (loyers, amortissement des locaux, assurances, etc.), etc. Les indicateurs permettant d'évaluer ces coûts sont similaires à ceux relatifs aux de temps de main d'œuvre. Ainsi, on a le coût moyen de maintenance par heure de fonctionnement, par activité de maintenance, par mission, par mois ou par an. Le tableau 3.5 présente les formules permettant de calculer le coût moyen de maintenance par heure de fonctionnement et par activité de maintenance. Les autres se déduisent facilement à partir de ces deux-là.

Tableau 3.5 Indicateurs de coûts de maintenance

Indicateur	Maintenance corrective	Maintenance préventive
Coût par heure de fonctionnement	$MCc / OH = \sum_{i=1}^N \lambda_i \times MCc_i$	$MCp / OH = \sum_{j=1}^M f_j \times MCp_j$
	$MC / OH = \frac{\lambda \times (MCc / OH) + f \times (MCp / OH)}{\lambda + f}$	
Coût moyen par activité	$MCc / MA = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \times MCc_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}$	$MCp / MA = \frac{\sum_{j=1}^M f_j \times MCp_j}{\sum_{j=1}^M f_j}$
	$MC / MA = \frac{\lambda \times (MCc / MA) + f \times (MCp / MA)}{\lambda + f}$	

En résumé, nous avons présenté ci-dessus les indicateurs de maintenabilité utilisés en exploitation. Nous les avons regroupés en quatre familles : les indicateurs de durées des activités de maintenance, les indicateurs de fréquences des activités de maintenance, les indicateurs de temps de main d'œuvre et les indicateurs de coûts des activités de maintenance. Les tableaux 3.2 à 3.5 présentent les expressions des indicateurs de chaque famille. Ces expressions nous permettent d'identifier les paramètres à évaluer pour estimer chaque indicateur. Nous présentons dans les deux sous-sections suivantes les sources d'obtention des données qui permettent d'évaluer ces paramètres en phase d'exploitation et en phase de conception du système.

### 3.2.2 Obtention des données

La sous-section précédente nous a permis d'identifier les paramètres nécessaires au calcul des indicateurs de maintenabilité utilisés en exploitation. Ces paramètres sont :

- Les taux de pannes des composants,  $\lambda_i$ ;



- Les fréquences des activités de maintenance préventive,  $f_j$ ;
- Les moyennes des temps techniques de réparation des composants,  $MTTR_i$ ;
- Les moyennes des temps d'exécution des activités de maintenance préventive,  $Mpt_j$ ;
- Le nombre d'opérateurs affectés à maintenance corrective de chaque composant,  $Nc_i$ ;
- Le nombre d'opérateurs affectés à chaque activité de maintenance préventive,  $Np_j$ .
- Les coûts de maintenance corrective des composants,  $MCC_i$ ;
- Les coûts des activités de maintenance préventive,  $MCP_j$ .

### 3.2.2.1 Sources de données en exploitation

- *Principale source d'obtention des données en exploitation : l'historique de vie du système*

En phase d'exploitation d'un système, les taux de pannes  $\lambda_i$  et les temps techniques de réparation  $MTTR_i$  et de maintenance préventive  $Mpt_j$  sont estimés essentiellement à partir de l'historique de vie du système. Cet historique, s'il est bien renseigné, contient des informations sur tous les événements survenus dans la vie du système depuis son installation. Si les enregistrements sont bien effectués, l'historique de vie du système va disposer des informations telles que : les dates d'arrêts du système, les causes des arrêts, les réparations effectuées, les opérateurs ayant effectué ces réparations et les dates de remise en état de fonctionnement. L'analyse de ces informations permet de déterminer les paramètres tels que  $\lambda_i$ ,  $MTTR_i$ ,  $Mpt_j$ , et, dans une certaine mesure,  $Nc_i$  et  $Np_j$ .

- *Sources d'obtention des fréquences des activités de maintenance préventive*

Les fréquences  $f_j$  des activités de maintenance préventive sont très souvent fournies par le fabricant du système. En effet, ce dernier définit en général les activités de maintenance préventive (remplacement d'un composant, d'un lubrifiant, etc.) à exécuter sur le système, ainsi que leur fréquence d'exécution dans des conditions données de fonctionnement.

Cependant, les conditions réelles de fonctionnement du système peuvent être différentes de celles définies par le fabricant. Cela peut nécessiter un ajustement des fréquences des activités de maintenance préventive. Dans ce cas, les nouvelles valeurs des  $f_j$  peuvent aussi être déduites à partir de l'analyse de l'historique de vie du système.

*- Sources d'obtention des coûts des activités de maintenance*

Les coûts  $MCC_i$  et  $MCP_j$ , quant à eux, sont évalués grâce à des outils comme la comptabilité analytique ou la méthode ABC (*Activity Based Costing*). Mais, cette évaluation est assez difficile à cause de la complexité des éléments à prendre en compte : le coût des pièces de rechange (achat, transport et stockage), le coût de main d'œuvre (embauche, formation et salaire), le coût de l'outillage (acquisition, amortissement, utilisation), etc.

Donc, en dehors des coûts, les autres paramètres peuvent être obtenus, en exploitation, à partir de l'historique de vie du système, lorsqu'il existe. Cependant, ce n'est pas toujours le cas. En l'absence d'historique, par exemple au début de la phase d'exploitation d'un nouveau système, certains paramètres, notamment,  $\lambda_i$ ,  $f_j$ ,  $MTTR_i$  et  $Mpt_j$  peuvent être obtenus à partir d'autres sources présentées ci-dessous. La phase de conception d'un nouveau système étant aussi une phase dans laquelle aucun historique n'est disponible, ces sources peuvent aussi être exploitées en conception. Nous les présentons dans la sous-section suivante.

### **3.2.2.2 Autres sources de données pouvant être exploitées en conception**

*- Autres sources d'obtention des taux de pannes des composants,  $\lambda_i$*

En phase de conception, les composants que le concepteur intègre dans une solution peuvent être séparés en deux groupes. Le premier est constitué des composants dont des modèles identiques ou similaires ont déjà été utilisés dans d'autres systèmes existants ou ayant existé (exemple : composants standards). Le second groupe est constitué des composants nouveaux, spécifiquement conçu pour la solution générée.

Bien que l'historique de vie du système soit totalement inexistant au stade de la conception, on peut trouver des données sur les composants du premier groupe. Ces données sont issues

des historiques des systèmes existants (ou ayant existé) dans lesquels ces composants ont déjà été intégré. Plusieurs collections de données de fiabilité sont disponibles dans divers secteurs d'activités. L'activité de collecte des données de fiabilité avait atteint son apogée dans les années 1980. Elle a malheureusement diminué en intensité dans les années 1990 et depuis cette période, la majorité des bases de données publiées n'a plus été mise à jour (Smith, 2005). Les bases de données disponibles peuvent être classées en trois catégories :

- Les bases de données spécifiques à une entreprise ou à un site industriel : ce sont des données collectées des équipements similaires, utilisés dans des conditions similaires par une entreprise ;
- Les bases de données spécifiques à une industrie : les données sont issues d'un secteur d'activité donné (télécommunication, nucléaire, militaire, etc.)
- Les bases de données génériques : les données proviennent de plusieurs secteurs d'activités et de plusieurs sources. Ces bases de données présentent souvent des expressions mathématiques qui sont des modèles de régression pour l'estimation des taux de panne, par exemple.

Les informations disponibles dans ces bases de données sont valables sous certaines conditions (température, environnement, etc.) quelques fois indiquées. Elles supposent généralement que les taux de pannes sont constants dans les conditions spécifiées. Le tableau 3.6 présente quelques bases de données de fiabilité et leur auteur. Les taux de pannes des composants sont les principales informations contenues dans ces bases de données.

Tableau 3.6 Quelques bases de données de fiabilité

<b>Base de données (dernière mise jour)</b>	<b>Auteur</b>	<b>Catégorie et remarques</b>
NRPD-5, Non-Electronic Parts Reliability Data (1995)	RIAC (Reliability Information Analysis Center), USA	- Générique (composants électromécaniques, mécaniques, hydraulique et pneumatiques) - Quelques modes de défaillances.
Handbook of Reliability Prediction for Mechanical Equipment (2007)	NSWC (Naval Surface Warfare Center), USA	- Générique (composants mécaniques) - Modes de défaillances - Expressions des taux de panne
OREDA, Offshore Reliability Data (1997)	Consortium de neuf compagnies pétrolières (BP, Elf, Agip, Shell, Total, etc.)	- Spécifique à l'industrie pétrolière - Modes de défaillances détaillés. - $MTTR_i$
TECHNIS	Technis, UK	- Générique et industrie. - Plusieurs modes de défaillances - Quelques temps de réparation
UKAEA, United Kingdom Atomic Energy Authority	SRD (System Reliability Department) of UKAEA	- Générique et industrie nucléaire - Plusieurs modes de défaillance
ANSI/IEEE500 (1991)	IEEE	- Spécifique réacteurs nucléaires - Temps de réparations
NUCLARR, Nuclear Computerized Library for Assessing Reactor Reliability	NRC (Nuclear Regulatory Commission), USA	- Spécifique réacteurs nucléaires - taux de pannes logiciels - infos sur les erreurs humaines
EIREDA European Industry	EDF, France	- Spécifique à la production

Reliability Data (1997)		d'énergie électrique (composants mécaniques et électriques)
EPRI	EPRI (Electric Power Research Institute), USA	- Spécifique à la production d'énergie électrique (turbines à gaz)
GADS (Generating Availability Data System)	NERC (North American Electric Reliability Council).	- Spécifique à la production d'énergie électrique - Données (statistiques) annuelles - Ouvert à d'autres producteurs d'électricité du monde entier depuis 2004
US Military Handbook 217 (1992)	RIAC (Reliability Information Analysis Center), USA Department of Defense	- Générique (composants électroniques). - Expressions des taux de pannes.
HRD5, Handbook of Reliability Data (1994)	British Telecom, UK	- Spécifique à l'industrie des télécommunications
Recueil de Données de Fiabilité	CNET (Centre National d'Études des Télécommunications), France	- Spécifique à l'industrie des télécommunications. - Expressions des taux de pannes
BELLCORE5, Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment (1995)	BELL (compagnie téléphonique), USA	- Spécifique à l'industrie des télécommunications.
EPRD-97 Electronic Parts Reliability Data (1997)	RIAC (Reliability Information Analysis Center), USA	- Générique (composants électroniques)

Bien qu'elles soient très utiles, les bases de données présentent tout de même plusieurs inconvénients qui invitent à une prudence lors de leur utilisation (Smith, 2005) :

- Les conditions d'exploitation ne sont pas toujours spécifiées. Et quand elles le sont, l'étendue des valeurs que peut prendre le paramètre décrit est souvent assez large;
- Certaines bases de données comptabilisent les remplacements préventifs alors que d'autres ne prennent en compte que le correctif;
- Ce qui est considéré comme défaut et enregistré dans une base de donnée peut être ignoré dans une autre base de donnée. Car, la définition d'un défaut ou d'une défaillance varie en fonction de l'utilisateur.
- Certaines bases de données contiennent des enregistrements de diagnostics effectués sur fausses alertes. Si ces enregistrements sont comptabilisés dans le calcul des taux de pannes, ceux-ci peuvent être faussement gonflés.
- Certaines bases de données précisent les modes de défaillances alors que d'autres ne les distinguent pas.

Pour les composants du second groupe (composants spécifiquement conçus pour le système en cours de développement), les  $\lambda_i$  peuvent être évalués : soit par similarité lorsqu'il existe des composants plus ou moins similaires appartenant au premier groupe pour lesquels les bases de données sont disponibles, soit par les approches Bayésiennes qui permettent d'estimer des paramètres en prenant en compte à la fois les connaissances des experts et les données expérimentales, soit alors par des essais virtuels dont la faisabilité a été démontrée (Zwingmann, 2005) ou par des essais accélérés. Notons que certaines bases de données du tableau 3.6 proposent des expressions permettant d'évaluer les taux de pannes de certains composants.

- *Obtention des fréquences des activités de maintenance préventive,  $f_j$*

Les fréquences des activités de maintenance préventive peuvent être déduites à partir des mêmes sources que les taux de pannes. Le remplacement préventif d'un composant sera

nécessaire si la durée de vie du composant est inférieure à la durée de mission de l'équipement. À partir des bases de données, on peut estimer les durées de vie des composants et donc déduire la fréquence des remplacements préventifs sur l'horizon d'exploitation du système.

- *Obtention des  $MTTR_i$  et  $Mpt_j$*

Les  $MTTR_i$  et les  $Mpt_j$  représentent la somme des durées des étapes de la phase active de maintenance corrective et préventive, respectivement (tableau 3.1). Certaines bases de données comme OREDA fournissent les temps de réparation des composants. Il est aussi possible d'estimer la durée de chaque étape de la phase active de maintenance d'un système en phase de conception, à partir de son modèle CAO. Par exemple, l'évaluation de la durée de démontage ou de remontage d'un composant est possible grâce, d'une part, aux algorithmes de désassemblage (Lambert, 2003) ou (Zwingmann et al., 2008) et, d'autre part, à l'existence des bases de données de temps standards des actions élémentaires de maintenance (vissage, sertissage, etc). Avec ces deux éléments (algorithmes de désassemblage et temps standards des actions élémentaires de maintenance), on peut évaluer le temps de démontage d'un composant de la manière suivante : on applique l'algorithme de désassemblage au modèle CAO du système pour déterminer la séquence optimale de démontage du composant. Connaissant la structure du produit, cette séquence va permettre de déterminer les différentes liaisons à défaire pour accéder au composant. En affectant à chaque liaison le temps standard approprié, on peut estimer le temps de démontage ou de remontage du composant. Un modèle mathématique basé sur ce principe et permettant d'optimiser le temps de démontage est proposé dans (Menye et al, 2009). Les durées des autres étapes de la phase active de maintenance peuvent être estimées à l'aide de certaines des méthodes citées plus haut (approche Bayésienne, similarité, etc.).

### **3.2.3 Indicateurs de maintenabilité pouvant être évalués en conception**

En définitive, les expressions des quatre familles d'indicateurs de maintenabilité disponibles dans la littérature font intervenir les paramètres suivants : les taux de panne ( $\lambda_i$ ), les fréquences des activités de maintenance préventive ( $f_j$ ), les moyennes des temps

techniques de réparation des composants ( $MTTR_i$ ), les moyennes des temps d'exécution des activités de maintenance préventive ( $Mpt_j$ ), le nombre d'opérateurs affectés à la maintenance corrective de chaque composant ( $Nc_i$ ), le nombre d'opérateurs affectés à chaque activité de maintenance préventive ( $Np_j$ ), les coûts par activité de maintenance corrective ( $MCC_i$ ) et les coûts par activité de maintenance préventive ( $MCP_j$ ). Nous venons d'effectuer ci-dessus une analyse des sources d'obtention des données d'évaluation de ces paramètres. Cette analyse montre qu'il est possible d'estimer certains d'entre eux, notamment  $\lambda_i$ ,  $f_i$ ,  $MTTR_i$  et  $Mpt_j$ , en phase de conception, grâce à diverses sources de données comme les nombreuses bases de données de fiabilité collectés par divers organismes (tableau 3.6). Les quatre paramètres  $\lambda_i$ ,  $f_i$ ,  $MTTR_i$  et  $Mpt_j$  sont les seuls qui interviennent, comment le montrent le tableau 3.7, dans les expressions des indicateurs de durée et des indicateurs de fréquence des activités de maintenance. Ces deux familles sont donc celles qui peuvent être évaluées avec moins de difficultés en phase de conception. Au chapitre 4, nous choisissons l'un d'entre eux, précisément la Moyenne des Temps Techniques de Réparation, MTTR, pour évaluer le niveau de maintenabilité d'une solution au stade de la conception. Ce choix repose sur le fait que le MTTR est le plus connu et le plus utilisé des indicateurs de maintenabilité. Il faut tout de même préciser que dans une situation contractuelle, le choix de l'indicateur peut être imposé par l'utilisateur final.

Tableau 3.7 Synthèse des paramètres dans chaque famille d'indicateurs de maintenabilité

	$\lambda_i$	$f_i$	$MTTR_i$	$Mpt_j$	$Np_i$	$Nc_i$	$MCC_i$	$MCP_j$
Durée	X	X	X	X				
Fréquence	X	X						
Main d'œuvre	X	X	X	X	X	X		
coût	X	X					X	X

En somme, quatre familles d'indicateurs sont utilisées dans la littérature. Dans chaque famille, les indicateurs sont calculés à partir des mêmes paramètres. Nous avons montré



que deux familles d'indicateurs peuvent être évaluées en conception : les indicateurs de durée et les indicateurs de fréquence des activités de maintenance. Le choix d'un ou de plusieurs indicateurs dépend de l'utilisateur final et des données disponibles pour l'évaluation. Un indicateur agrégé, combinant plusieurs autres indicateurs, peut aussi être utilisé selon le besoin.

### 3.3 Indicateurs de disponibilité en conception

Dans la section 3 précédente, nous avons analysé les indicateurs de maintenabilité pour déterminer ceux pouvant être évalués en conception. Dans cette section, nous procédons de la même manière avec les indicateurs de disponibilité. Après avoir rappelé la définition de la disponibilité, nous analysons les indicateurs de disponibilité utilisés en exploitation pour identifier ceux pouvant être évalués en conception.

#### 3.3.1 Indicateurs de disponibilité en exploitation

La disponibilité est définie comme étant la probabilité pour que le système, utilisé dans les conditions prévues, soit en état d'accomplir une fonction requise à un instant donné (IEC 60050-191, 1990). Cette définition suppose que le système soit utilisé et maintenu dans les conditions prescrites (Ebeling, 1997). La disponibilité peut être interprétée comme étant la proportion de temps où le système est en état de fonctionnement par rapport au temps total sur un horizon donné. Elle dépend donc à la fois de la fiabilité et de la maintenabilité du système. La disponibilité peut être mesurée:

- à un instant  $t$  donné, on parle alors de *disponibilité instantanée*,  $A(t)$  ;
- dans un intervalle  $[0, T]$ , c'est la *disponibilité moyenne dans l'intervalle*  $[0, T]$ ,  $A(T)$  :

$$A(T) = (1/T) \int_0^T A(t) dt \quad (3.1)$$

La disponibilité moyenne peut être généralisée sur un intervalle de temps  $[t_1, t_2]$ , représentant par exemple une mission. On parle alors de *disponibilité de mission*,

$$A_{t_2-t_1}$$

$$A_{t_2-t_1} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt \quad (3.2)$$

- sur, un horizon infini, c'est la *disponibilité en régime permanent*,  $A$

$$A = \lim_{T \rightarrow \infty} A(T) \quad (3.3)$$

En exploitation, il existe trois types de disponibilité en régime permanent qui dépendent de ce qu'on inclut dans les définitions du temps de bon fonctionnement et du temps d'arrêt (Ireson, 2002), (Dhillon, 2002), (Ebeling, 1997). Ces disponibilités sont présentées ci-dessous.

### 3.3.1.1 Disponibilité stationnaire ou *Up Time Ratio UTR*

UTR représente la disponibilité du système dans un environnement idéal où les ressources requises (compétences humaines, outillage, pièces de rechange, documentation, etc.) sont disponibles. Le calcul de UTR est effectué selon l'expression (3.4). Cette expression prend en compte uniquement les temps d'arrêt dus à la maintenance corrective. Les arrêts dus à la maintenance préventive, les temps logistiques et les temps administratifs ne sont pas considérés.

$$UTR = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.4)$$

### 3.3.1.2 Disponibilité inhérente, $A_a$

La disponibilité inhérente prend en compte les temps d'arrêt dus à l'exécution des tâches de maintenance corrective et préventive. Elle est calculée selon l'expression (3.5). Les temps administratifs et logistiques ne sont pas pris en compte.

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + M} \quad (3.5)$$

Où  $MTBM$  et  $\overline{M}$  représentent respectivement la moyenne des temps de fonctionnement entre les actions de maintenance préventive et corrective (tableau 3.3) et la moyenne combinée des temps actifs de maintenance corrective et préventive (tableau 3.2).

### 3.3.1.3 Disponibilité opérationnelle, $A_o$

La disponibilité opérationnelle, traduite par l'expression (3.6), prend en compte la réalité de l'environnement en intégrant, dans son expression, le temps d'arrêt total du système. Le temps d'arrêt total prend en compte les temps d'arrêt dus à l'exécution des tâches de maintenance préventive et corrective, les temps d'attentes (temps morts) dus aux opérations logistiques et les temps d'attente dus aux formalités administratives.

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (3.6)$$

Avec :

$MDT$  : *Mean DownTime* (Moyenne des temps d'arrêt du système)  $MDT = \overline{M} + \overline{LDT} + \overline{ADT}$

$\overline{LDT}$  : *Logistics Delay Time* (Moyenne des Temps logistiques)

$\overline{ADT}$  : *Administrative Delay Time* (Moyenne des Temps administratifs)

Le tableau 3.8 présente les expressions des temps morts logistiques et administratifs pour les activités de maintenance corrective et préventive.

Les expressions de ces trois indicateurs font intervenir les termes  $MTBF$ ,  $MTTR$ ,  $MTBM$ ,  $\overline{M}$  ou  $MDT$ . En se référant aux tableaux 3.2, 3.3 et 3.8, on identifie les paramètres intervenant dans ces termes. Dans la sous-section suivante, nous analysons les sources d'obtention des données permettant d'estimer ces paramètres en vue de déterminer celles pouvant être exploitées en conception.

Tableau 3.8 Expressions des temps logistiques et administratifs.

	Maintenance corrective	Maintenance préventive
Moyenne des temps logistiques	$\overline{LDTc} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \times LDTc_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}$	$\overline{LDTp} = \frac{\sum_{j=1}^M f_j \times LDTp_j}{\sum_{j=1}^M f_j}$
	$\overline{LDT} = \frac{(\lambda \times \overline{LDTc}) + (f \times \overline{LDTp})}{\lambda + f}$	
Moyenne des temps administratifs	$\overline{ADTc} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \times ADTc_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}$	$\overline{ADTp} = \frac{\sum_{j=1}^M f_j \times ADTp_j}{\sum_{j=1}^M f_j}$
	$\overline{ADT} = \frac{(\lambda \times \overline{ADTc}) + (f \times \overline{ADTp})}{\lambda + f}$	

### 3.3.2 Sources d'obtention des données

Les expressions des indicateurs de disponibilité présentés ci-dessus font intervenir les paramètres suivants :

- Les taux de pannes des composants,  $\lambda_i$  ;
- Les fréquences des activités de maintenance préventive,  $f_j$  ;
- Les moyennes des temps techniques de réparation des composants,  $MTTR_i$  ;
- Les moyennes des temps d'exécution des activités de maintenance préventive,  $Mpt_j$  ;
- Les Temps logistiques pour la maintenance corrective des composants,  $LDTc_i$
- Les Temps logistiques pour les activités de maintenance préventive,  $LDTp_j$
- Les Temps administratifs pour la maintenance corrective des composants,  $ADTc_i$
- Les Temps administratifs pour les activités de maintenance préventive,  $ADTp_j$

Les sources d'obtention des  $\lambda_i$ ,  $f_i$ ,  $MTTR_i$  et  $Mpt_j$  ont déjà été présentées dans la sous-section 3.2. Il en résulte qu'en exploitation, ces paramètres sont essentiellement estimés à partir de l'historique de vie du système. Cependant, lorsque l'historique n'est pas disponible, comme c'est le cas en conception, il existe d'autres sources d'obtention des données permettant de les évaluer. Ces quatre paramètres peuvent donc être évalués en conception. Il ne reste donc plus qu'à identifier les sources de données permettant d'évaluer les temps logistiques  $LDTc_i$  et  $LDTp_j$  et les temps administratifs  $ADTc_i$  et  $ADTp_j$ .

Les temps logistiques représentent la durée requise pour préparer toute la logistique nécessaire à l'exécution d'une activité de maintenance (préparation de l'outillage, approvisionnement en pièces de rechange, préparation de la documentation requise, etc.). Les temps logistiques varient en fonction de la disponibilité des pièces de rechange, de l'éloignement des fournisseurs de pièces de rechange, de l'éloignement du site d'intervention, de la disponibilité des opérateurs, de la disponibilité et de la qualité de la documentation, etc. Les temps administratifs quant à eux représentent la durée requise pour les formalités administratives préalables à toute intervention (émission des bons de travail, autorisation de sortie des pièces de rechange, etc.). Les temps administratifs dépendent des procédures administratives mises en place par l'utilisateur du système. En définitive, les temps logistiques et les temps administratifs dépendent beaucoup du contexte d'exploitation du système. De ce fait, il serait très difficile de les évaluer en conception.

### 3.3.3 Indicateurs de disponibilité pouvant être évalués en conception

Dans les sous-sections précédentes, nous avons, d'une part, identifié les paramètres figurant dans les expressions des indicateurs de disponibilité :  $\lambda_i$ ,  $f_i$ ,  $MTTR_i$ ,  $Mpt_j$ ,  $ADTc_i$ ,  $ADTp_j$ ,  $LDTc_i$  et  $LDTp_j$  (tableau 3.9). D'autre part, nous avons analysé les sources d'obtention des données permettant d'estimer ces paramètres. Il ressort de cette analyse que, seuls, les paramètres  $\lambda_i$ ,  $f_i$ ,  $MTTR_i$  et  $Mpt_j$  peuvent être évalués en conception. Le tableau 3.9 montre que la disponibilité stationnaire,  $UTR$  (*Up Time Ratio*) et la disponibilité inhérente  $A_a$  ne dépendent que d'une partie ou de l'ensemble de ces quatre

paramètres. Par conséquent, ces deux indicateurs de disponibilité peuvent être évalués en conception.

Tableau 3.9 Paramètres d'indicateurs de disponibilité

	$\lambda_i$	$f_i$	$MTTR_i$	$Mpt_j$	$ADTc_i$	$ADTp_j$	$LDTc_i$	$LDTp_j$
$UTR$	X		X					
$A_a$	X	X	X	X				
$A_o$	X	X	X	X	X	X	X	X

L'indicateur  $UTR$  ne prend en compte que la maintenance corrective alors que l'indicateur  $A_a$  prend en compte la maintenance corrective et la maintenance préventive. Nous nous intéressons particulièrement à la maintenance corrective. Par conséquent, pour l'évaluation de la disponibilité en conception, nous considérons comme indicateur de disponibilité le *Up Time Ratio*,  $UTR$ .

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les indicateurs de maintenabilité et de disponibilité utilisés en exploitation afin de déterminer ceux pouvant être évalués en conception. Cette analyse nous a permis de conclure que les indicateurs de durée des activités de maintenance et les indicateurs de fréquence des activités de maintenance pouvaient être utilisés en conception pour évaluer la maintenabilité d'un système. Pour évaluer la maintenabilité en conception dans le cadre de cette thèse, notre choix s'est porté sur la Moyenne des Temps Techniques de Réparation,  $MTTR$ , l'un des indicateurs de durée des activités de maintenance les plus utilisés. Concernant la disponibilité, la même démarche a été appliquée. Il en ressort que deux des trois principaux indicateurs de disponibilité utilisés en exploitation peuvent être évalués en conception. Il s'agit de la disponibilité inhérente et de la disponibilité stationnaire ou le *Up Time Ratio*,  $UTR$ . C'est ce dernier indicateur que nous avons choisi, dans cette thèse, comme indicateur de disponibilité en conception. Le chapitre

suisant présente une modélisation du processus de validation de chacun de ces deux indicateurs en phase de conception.

# **Chapitre 4 Modélisation du processus de validation de la maintenabilité et de la disponibilité d'un système en phase de conception**

## **4.1 Introduction**

Le chapitre précédent a permis de déterminer les indicateurs de maintenabilité et de disponibilité pouvant être évalué en conception. Deux des ces indicateurs ont été retenu dans le cadre de cette étude pour évaluer le niveau de maintenabilité et le niveau de disponibilité d'un système en phase de conception. Il s'agit de la Moyenne des Temps Techniques de Réparation, (MTTR), pour la maintenabilité et du *Up Time Ratio*, (UTR) pour la disponibilité. Ce chapitre présente une modélisation des processus de validation des exigences formulées à l'aide de ces indicateurs. La suite du chapitre se divise en quatre sections. La section 4.2 présente un modèle générique du processus pouvant être utilisé pour valider une caractéristique comportementale en conception. Les sections 4.3 et 4.4 présentent, respectivement, une application du processus générique aux cas de l'évaluation et de la validation du MTTR et du UTR d'une solution. Toutes les étapes sont présentées en détail : les données d'entrée, les données de sortie et les outils à mettre en œuvre. La section 4.5 présente une conclusion.

## **4.2 Processus générique de validation d'une performance comportementale**

Le processus de validation se déroule en aval du processus de conception. Durant la phase de conception, le concepteur génère une ou plusieurs solutions qui sont stockées dans une base de données (modèles CAO) de solutions à évaluer. Le déclenchement du processus de validation est effectué par le concepteur après qu'il ait choisi le modèle CAO de la solution à valider. Le processus de validation permet alors d'attester ou non que la solution évaluée satisfait l'exigence exprimée. Une boucle de retour permet de revenir au processus de conception afin d'améliorer, si possible, une solution dont le résultat de l'évaluation n'a pas été satisfaisant. Le processus générique de validation présenté par la figure 4.1 peut s'appliquer à la validation de n'importe quelle performance comportementale mesurée par



un indicateur quantifiable. Ce processus se décompose en trois étapes : collecte des données, évaluation de la solution et analyse des résultats de l'évaluation.

- *Collecte des données* : L'étape de collecte des données permet de recueillir toutes les données requises pour l'évaluation de l'indicateur utilisé. En général, ces données proviennent du modèle CAO de la solution et des sources extérieures à la CAO (bases de données, utilisateur, etc.).
- *Évaluation de la solution* : une fois les données collectées, la solution est évaluée par rapport à l'indicateur utilisé. Le résultat de l'évaluation est par la suite comparé au seuil spécifié dans le cahier de charges. Si l'exigence est satisfaite, la solution est stockée dans une base de données de solutions éligibles pour les essais sur prototypes physiques. Si, au contraire, l'exigence n'est pas satisfaite, on passe à l'étape d'analyse des résultats de l'évaluation.
- *Analyse des résultats* : si le résultat de l'évaluation n'est pas satisfaisant (seuil non respecté), cette étape permet alors d'analyser ces résultats en vue d'identifier les composants qui pénalisent la solution évaluée. Les outils mis en œuvre dépendent de l'indicateur utilisé. Au terme de l'analyse des résultats, le concepteur doit décider s'il modifie ou abandonne la solution. S'il opte pour l'abandon, la solution est alors stockée dans une banque de solutions abandonnées et le processus prend fin. Cependant, les solutions abandonnées ne sont pas perdues. Elles peuvent à nouveau intéresser ultérieurement le concepteur qui pourra alors décider de les retravailler. Si, au contraire, le concepteur décide de modifier la solution, elle rentre à nouveau dans le processus de conception où elle est modifiée. La nouvelle solution obtenue est alors identifiée différemment, par exemple avec un sous indice, et stockée dans la banque de solution à évaluer, en attente d'une nouvelle évaluation.

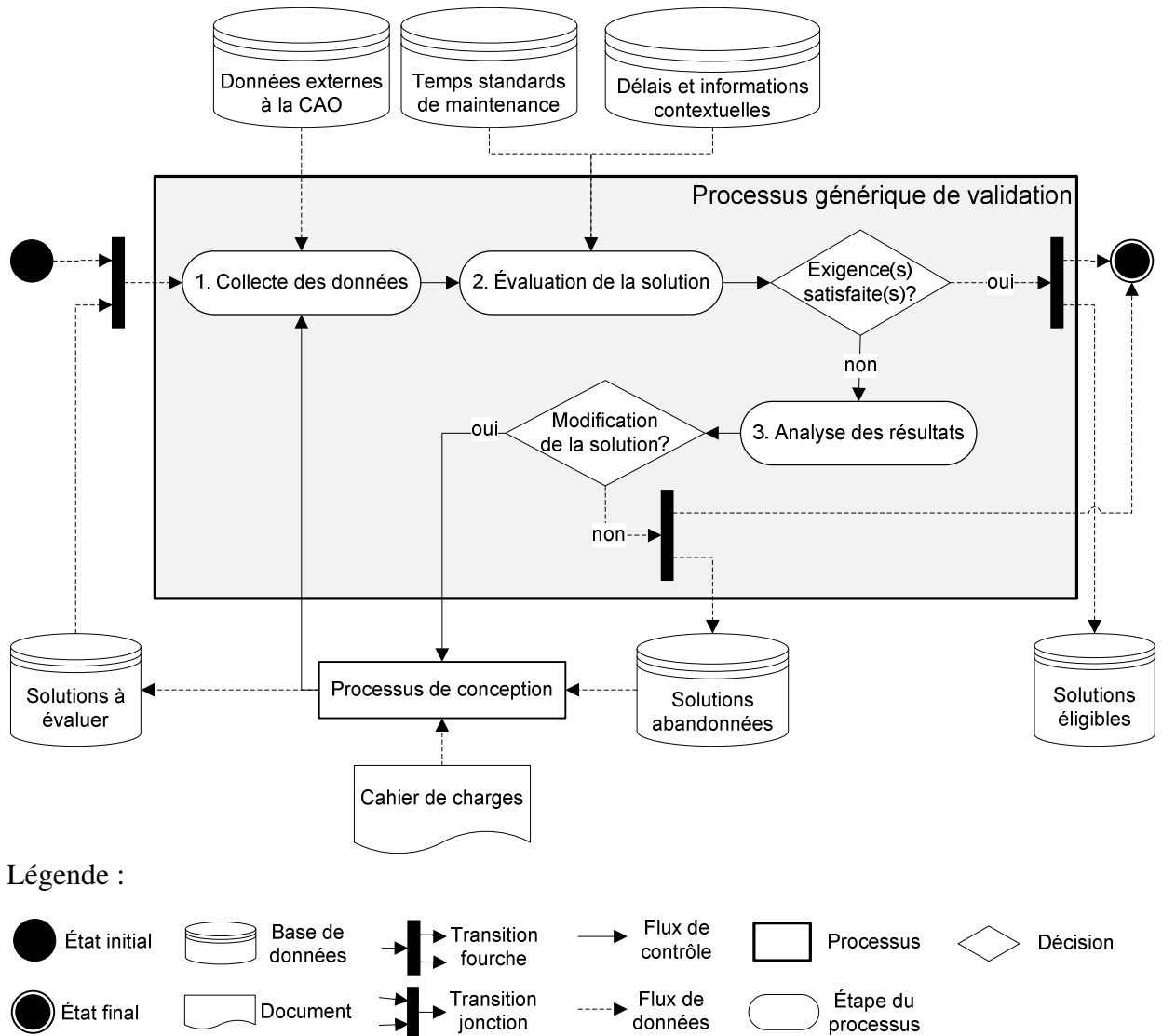


Figure 4.1 Processus générique de validation d'une performance comportementale

Chaque étape du processus de validation se décompose en sous-étapes qui dépendent de l'indicateur utilisé pour évaluer la caractéristique comportementale à valider. Les sections 4.4 et 4.5 présentent respectivement une application de ce processus à la validation de la maintenabilité et de la disponibilité.

### 4.3 Processus de validation du *MTTR* en conception

À la section précédente, la Moyenne des Temps Techniques de Réparation (*MTTR*) a été choisie comme indicateur à utiliser en conception pour évaluer le niveau de maintenabilité d'une solution générée par le concepteur. En supposant que la solution analysée a une structure série, le  $MTTR_s$  de la solution est alors calculé comme une moyenne pondérée des  $MTTR_i$  des composants avec pour coefficients de pondération les taux de pannes des composants,  $\lambda_i$ , comme l'indique l'équation (4.1). Le  $MTTR_i$  de chaque composant, quant à lui, est la somme des durées des étapes du processus actif de maintenance corrective : 1) Diagnostic de la panne (localisation et isolation du composant défaillant) ; 2) Démontage du composant défaillant ; 3) remplacement du composant défaillant ; 4) Remontage du composant de rechange ; 5) Vérification du bon fonctionnement. Le  $MTTR_i$  est alors obtenu par l'expression (4.2), où  $t_{ik}$  représente la durée de l'étape  $k$  du processus actif de maintenance corrective du composant  $i$ . D'après ces deux expressions, pour évaluer les  $MTTR_i$  et le  $MTTR_s$  d'une solution, il faut évaluer les taux de pannes  $\lambda_i$  des composants et les durées  $t_{ik}$ .

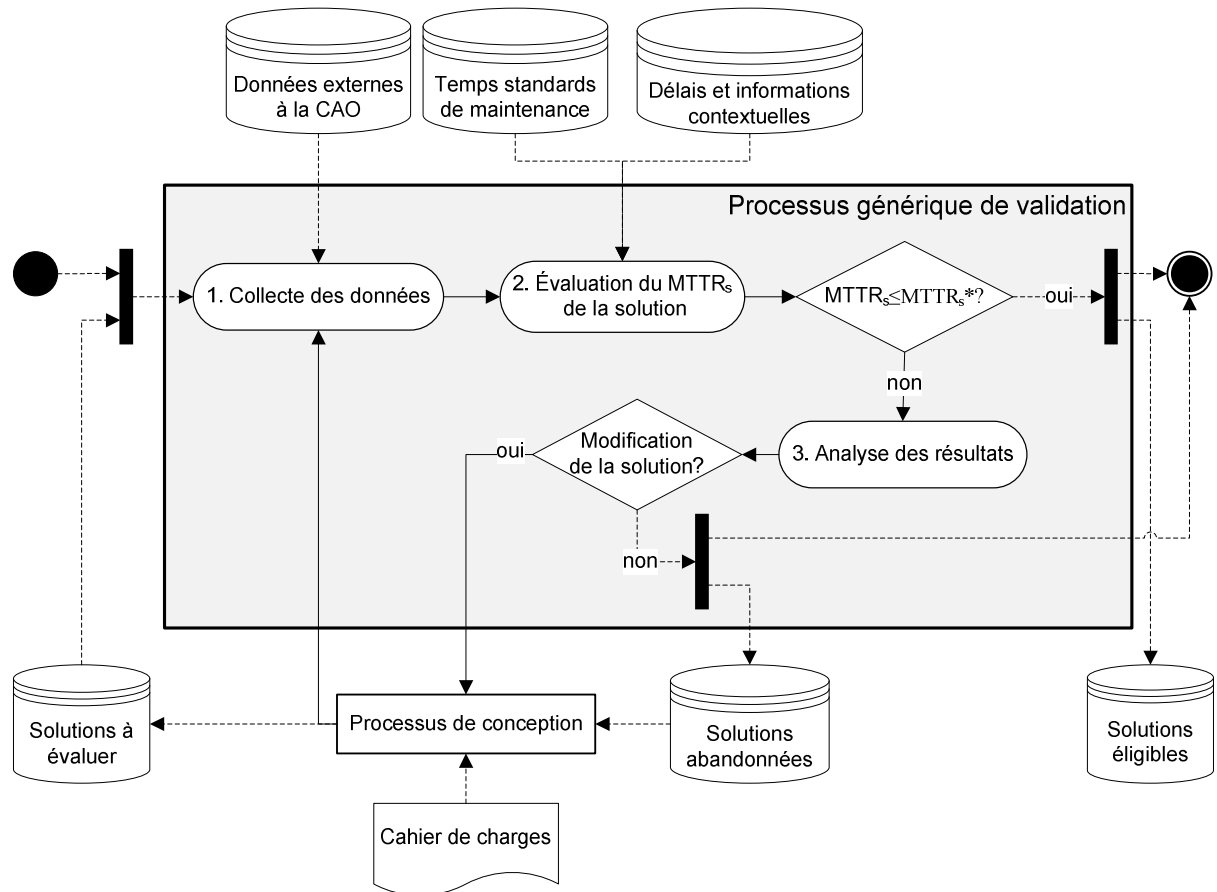
$$MTTR_s = \frac{\sum_i \lambda_i MTTR_i}{\sum_i \lambda_i} \quad (4.1)$$

$$MTTR_i = \sum_k t_{ik} \quad (4.2)$$

Nous supposons qu'un seuil  $MTTR_s^*$ , que doit satisfaire le système, est défini dans le cahier de charge. Le processus d'évaluation et de validation du  $MTTR_s$  d'une solution suit les étapes du processus générique de validation d'une caractéristique comportementale. La figure 4.2 présente le niveau agrégé des étapes du processus, calqué sur le processus générique.

Une décomposition de premier niveau de chaque étape agrégée est présentée sur la figure 4.3. Dans les lignes qui suivent, nous présentons de manière détaillée tous les niveaux de

décomposition de chaque étape, jusqu'aux sous-étapes (ou sous-processus) élémentaires. Pour chaque sous-étape élémentaire, nous présentons les données d'entrée, les données de sortie et les outils pouvant être mis en œuvre pour l'exécution de chaque sous-étape élémentaire.



Légende :

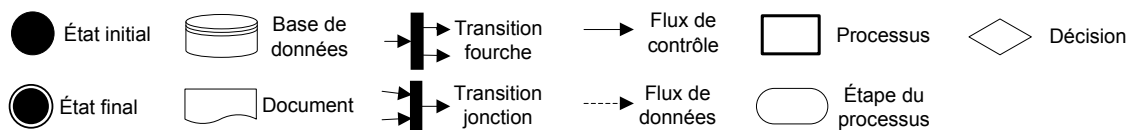


Figure 4.2 Étapes agrégées du processus de validation du  $MTTR_s$

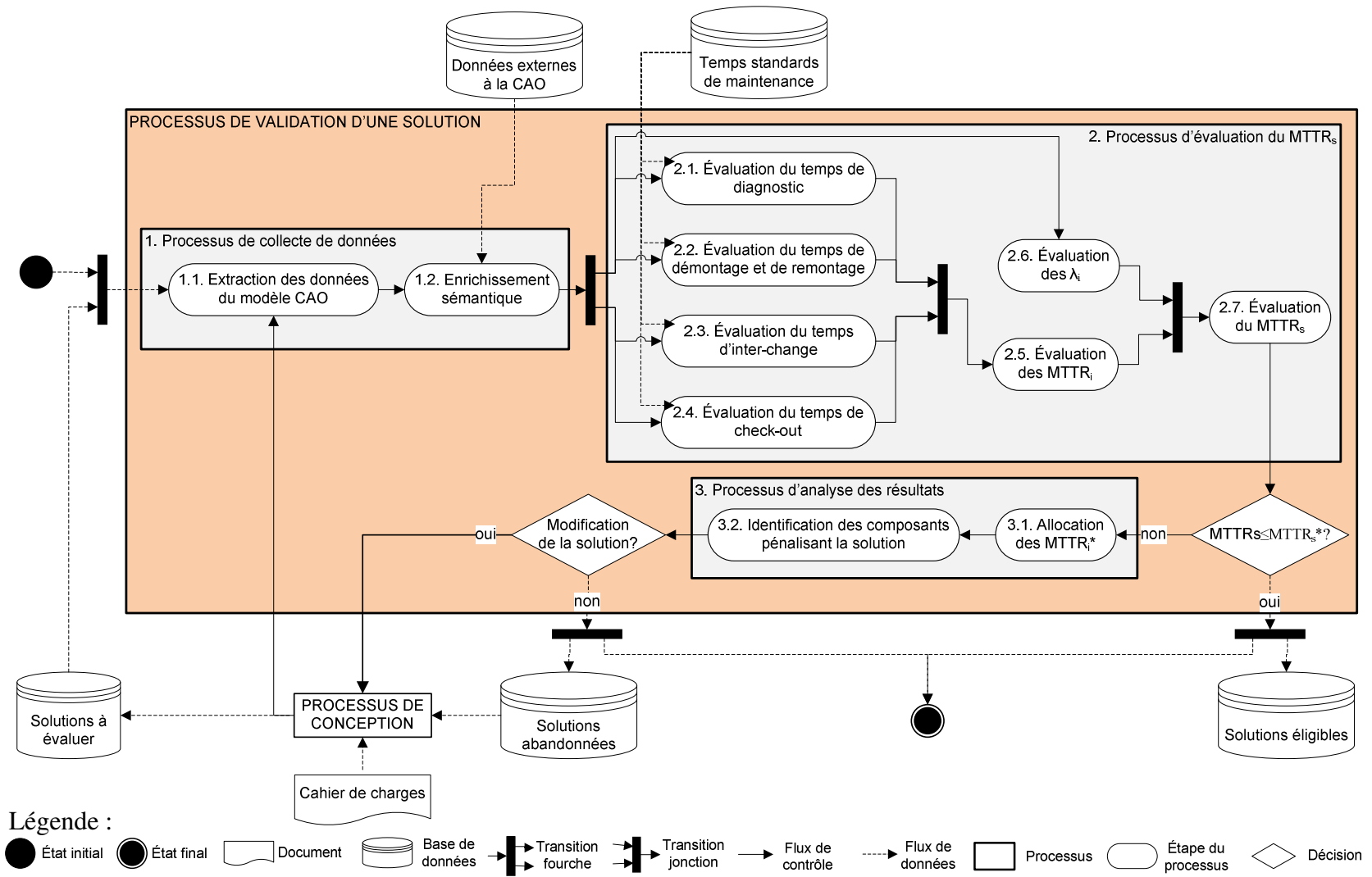


Figure 4.3 Processus intégré de validation du  $MTTR_s$

### 4.3.1 Étape 1 : Processus de collecte des données

D'après les expressions (4.1) et (4.2) ci-dessus, pour évaluer le  $MTTR_s$  il faut pouvoir évaluer les taux de pannes  $\lambda_i$  des composants et les durées  $t_{ik}$  des étapes de la phase active de maintenance corrective de chaque composant. Le processus de collecte des données requises pour l'évaluation de ces paramètres, et donc, du  $MTTR_s$  d'une solution, se décompose en deux étapes (figure 4.4) : l'extraction des données du modèle CAO de la solution et l'enrichissement sémantique de ces données. Les informations extraites du modèle CAO sont stockées dans la matrice sémantique (tableau 4.1). Certaines de ces informations sont utilisées à l'étape d'enrichissement sémantique où d'autres informations complémentaires extérieures à la CAO sont ajoutées manuellement.

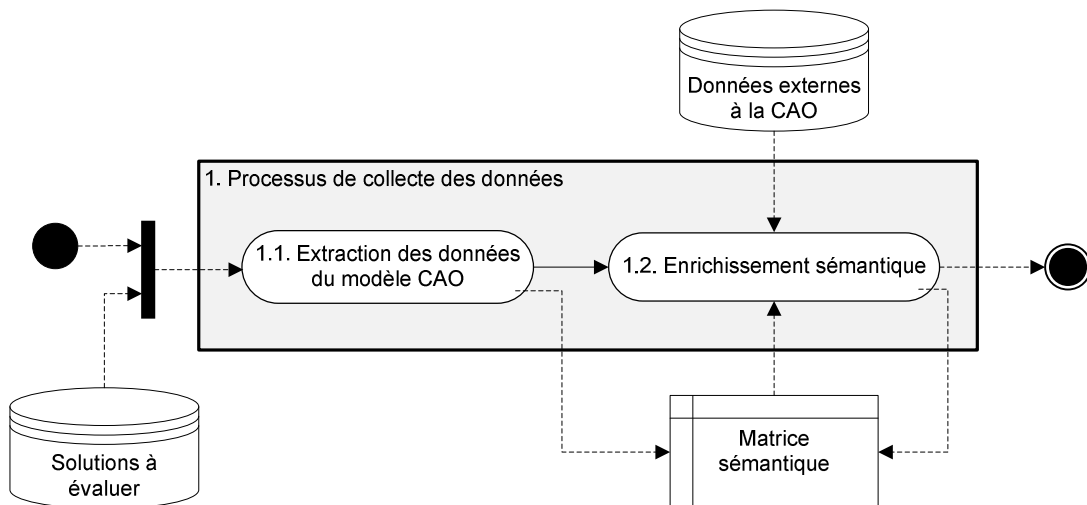


Figure 4.4 Décomposition du processus de collecte de données

Toutes les données relatives aux composants sont stockées dans la matrice sémantique que présente le tableau 4.1 (Coulibaly *et al.*, 2008). Cette matrice est renseignée et utilisée tout au long du processus et principalement dans cette étape de collecte de données. Les informations issues de l'étape d'extraction des données du modèle CAO sont consignées dans la sous-matrice carrée d'ordre  $n$  (où  $n$  est le nombre de composants) que nous appelons la matrice sémantique de base. Les cases  $(C_i, C_j)$  contiennent les informations sur

les types de liaisons (boulonnage, vissage, ...) entre les composants  $C_i$  et  $C_j$ . Les cases ( $C_i$ ,  $C_i$ ) contiennent un vecteur  $P_i$  de données spécifiques au composant  $C_i$  (géométrie, matériaux, ...). Les autres colonnes de la matrice sémantique stockent d'autres informations relatives aux composants (fiabilité, maintenabilité, ...).

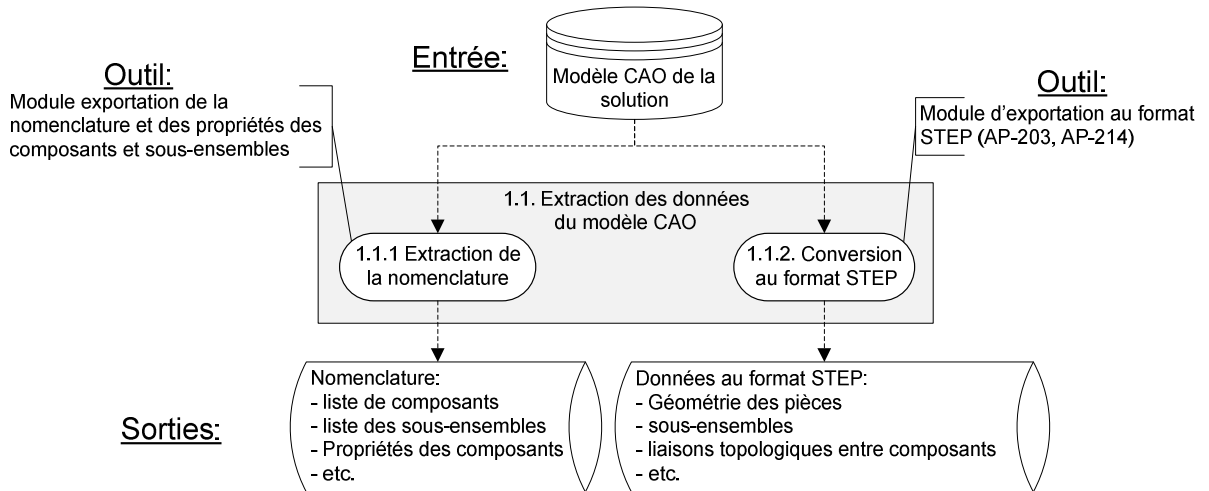
Tableau 4.1 Matrice sémantique

Composant	$C_1$	$C_2$	-	$C_j$	-	$C_n$	Maintenabilité	Taux de panne	...
$C_1$	$P_1$	2	1	0	2	0	MTTR <sub>1</sub>	$\lambda_1$	...
$C_2$		$P_2$	1	0	2	0	MTTR <sub>2</sub>	$\lambda_2$	...
-			-	1	2	0	-	-	-
$C_i$	Type liaison ( $C_i-C_1$ )= $L_{i1}$			$P_i$	2	5	MTTR <sub>i</sub>	$\lambda_i$	-
-					-	0	-	-	...
$C_n$						$P_n$	MTTR <sub>n</sub>	$\lambda_n$	...
Nombre de liaisons	$d_1$	$d_2$	-	$d_j$	-	$d_n$	$MTTR_s^*$ (seuil)	$\lambda_s^*$ (seuil)	

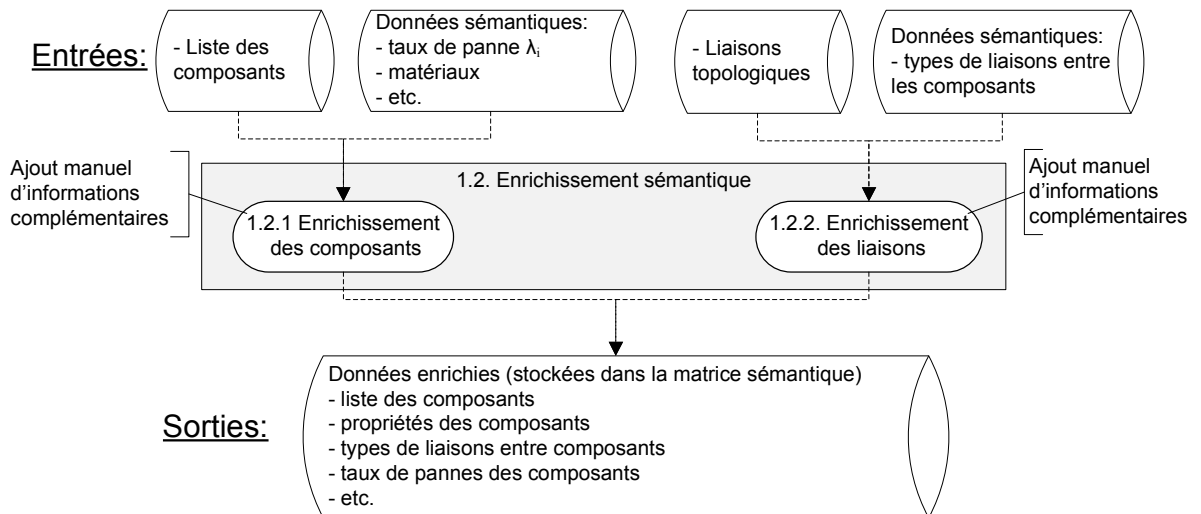
#### 4.3.1.1 Étape 1.1 : Processus d'extraction des données du modèle CAO

La première étape du processus de collecte de données est le sous-processus d'extraction des données du modèle CAO de la solution. Ce modèle CAO constitue donc la donnée d'entrée de ce sous-processus qui se décompose, à son tour, en deux étapes élémentaires (figure 4.5.a) :

- **Étape 1.1.1 : l'extraction de la nomenclature.** Cette étape est réalisée à l'aide du module d'extraction de la nomenclature et des propriétés des composants inclus dans les principaux logiciels de CAO, par exemples AutoCAD (Autodesk, 2005), CATIA (Tickoo, 2008) ou Pro/Engineer (Lamit, 2008). Les données de sortie de ce sous-processus sont : la liste des composants, la liste de sous-ensembles ou les propriétés des composants (traitement de surface, masse volumique, ...)



(a) Sous-processus d'extraction des données du modèle CAO



(b) Sous-processus d'enrichissement sémantique

Figure 4.5 Détails des étapes du processus de collecte de données



- **Étape 1.1.2 : la conversion du modèle CAO au format STEP** (*STandard for the Exchange of Product model data*). Cette étape permet d'extraire du modèle CAO d'autres informations que l'étape précédente ne permet pas de récupérer, par exemples, les liaisons topologiques (contact, coaxialité, etc.) entre les composants ou leurs caractéristiques géométriques (formes, dimensions, tolérances, etc.). Pour extraire ces données, le modèle CAO est importé ou converti au format STEP avec les protocoles d'application AP-203 et AP-214 (Coulibaly, 2008). Le format STEP est défini par la norme (ISO 10303-1, 1994). Les protocoles d'application AP-203 et AP-214 sont supportés par la plupart des logiciels de CAO. Le protocole AP-203 permet d'exporter la liste des composants alors que le protocole AP-214 permet d'exporter les propriétés géométriques et topologiques des composants et sous-ensembles.

Les données récupérées dans cette première étape du processus de collecte de données sont stockées dans la matrice sémantique. Toutes ces données ne seront pas forcément utilisées pour l'évaluation du  $MTTR_s$  de la solution, mais, peuvent être utiles pour l'évaluation d'autres indicateurs. Un filtre peut cependant être appliqué pour ne garder que les données requises pour l'évaluation de l'indicateur de la caractéristique comportementale qui doit être validée.

#### 4.3.1.2 Étape 1.2 : Processus d'enrichissement sémantique

Les données extraites du modèle CAO ne sont pas suffisantes pour évaluer le  $MTTR_s$  d'une solution. Il faut d'autres données extérieures à la CAO. La deuxième étape du processus de collecte des données, l'enrichissement sémantique, permet d'ajouter ces données complémentaires à celles issues du modèle CAO. L'étape d'enrichissement sémantique se décompose aussi en deux étapes élémentaires (figure 4.5.b) :

- **Étape 1.2.1 : l'enrichissement des composants**. Cette étape élémentaire permet de compléter les informations sur les composants en ajoutant les informations telles que les taux de pannes, les matériaux, etc.

- **Étape 1.2.2 : l'enrichissement des liaisons.** Cette deuxième étape élémentaire permet de compléter les liaisons topologiques (contact, coaxialité, etc.) extraites du modèle CAO, lors de sa conversion au format STEP, par les informations sur le nombre et les types de liaisons (vissage, rivetage, sertissage, etc.) entre les composants. Pour réaliser une connexion entre deux composants, on peut utiliser un seul ou plusieurs types de liaison. On parlera alors de liaison mono ou multi instance. Par ailleurs, un type de liaison donné peut être utilisé une ou plusieurs fois dans une même connexion. On parlera alors de liaison mono ou multi occurrence.

Comme à l'étape d'extraction des données du modèle CAO, les données ajoutées dans cette étape sont stockées dans la matrice sémantique.

### 4.3.2 Étape 2 : Processus d'évaluation du $MTTR_s$

D'après l'expression (4.1), l'évaluation du  $MTTR_s$  d'une solution passe par l'évaluation des taux de pannes  $\lambda_i$  et des temps de réparations  $MTTR_i$  des composants. L'expression (4.2) montre que l'évaluation du  $MTTR_i$  d'un composant passe par l'évaluation de la durée de chaque étape de la phase active de maintenance corrective du composant (tableau 3.1) : diagnostic, démontage, remplacement, remontage et vérification du bon fonctionnement (Military Handbook – 470A, 1997). La figure 4.5 schématise l'ensemble de ces étapes conduisant à l'évaluation du  $MTTR_s$  de la solution. Comme les étapes de démontage et de remontage du composant sont similaires, leur évaluation est regroupée à l'étape 2.2 de la figure 4.6. La durée de chacune de ces étapes doit être estimée avant de pouvoir estimer le  $MTTR_i$  du composant. C'est ce que traduit la transition jonction (équivalent d'un «ET»).

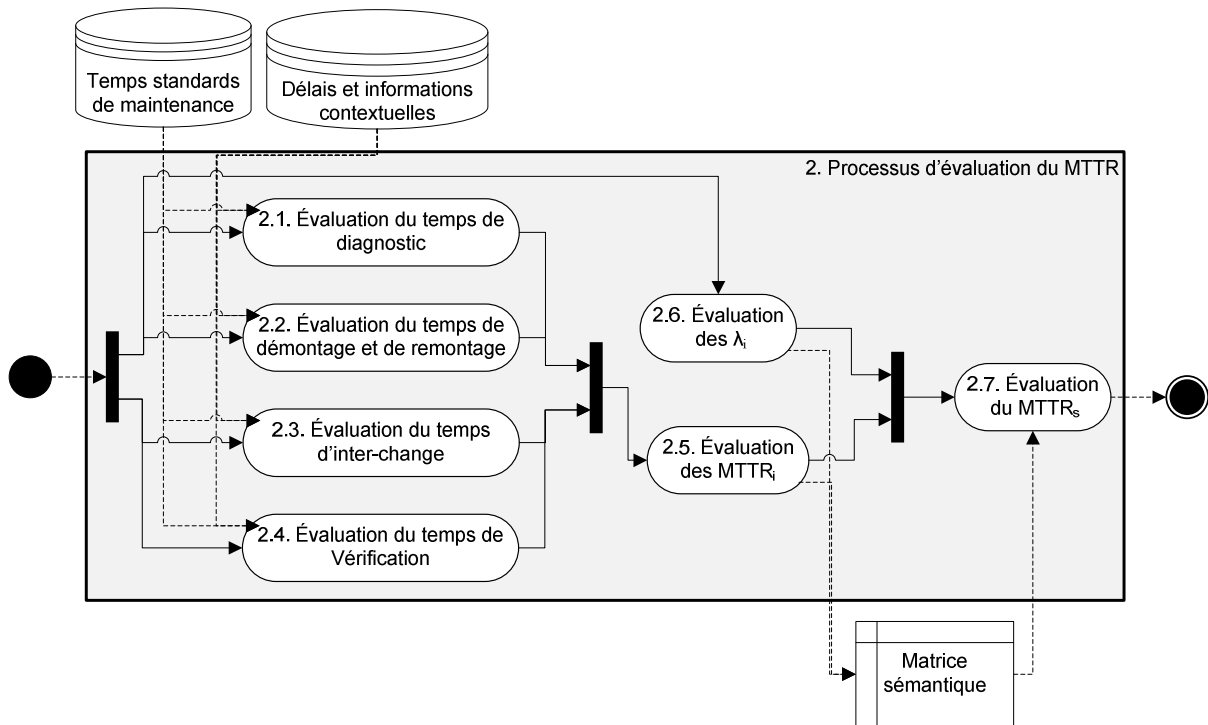


Figure 4.6 Étapes du processus d'évaluation du  $MTTR_s$

Nous présentons, dans les lignes suivantes, les détails (données d'entrée, données de sortie et outils mis en œuvre) de chaque étape de la figure 4.6.

#### 4.3.2.1 Étape 2.1 : Processus d'évaluation du temps de diagnostic

La première étape de la phase active du processus de maintenance corrective est le diagnostic dont le but est de localiser et isoler la panne. La durée de cette étape peut être évaluée en conception d'après le processus décrit par la figure 4.7.a. À partir des informations d'entrées telles que la fiabilité des composants, le profil d'utilisation, les conditions d'exploitation du système, etc., et à l'aide d'un outil d'analyse comme l'arbre de défaillances, le temps de diagnostic peut être estimé en suivant les étapes suivantes :

- Étape 2.1.1 : identification des modes de défaillances ;
- Étape 2.1.2 : identification des causes de chaque mode ;

- *Étape 2.1.3 : identification des composants responsables de chaque cause ;*
- *Étape 2.1.4 : définition des moyens et méthodes de diagnostic, et ;*
- *Étape 2.1.5 : estimation du temps de mise en œuvre de chaque méthode de diagnostic.*

Connaissant les modes de défaillances possibles du système, les composants susceptibles d'être à l'origine de chaque mode de défaillance et le temps de diagnostic de chaque défaillance, il est possible d'estimer, pour chaque composant, le temps moyen de diagnostic des pannes dont il est la cause. Ce temps peut être considéré comme le temps de diagnostic de la panne du composant. Comme indiqué plus haut, les outils d'analyse comme les arbres de défaillance (Nikolaos, 2005), (IEC 61025, 2006), les diagrammes blocs de fiabilité (IEC 61078, 2006), ou l'AMDE et l'AMDEC (IEC 60812, 2006), (Military Standard-1629A, 1980) peuvent être mis à contribution pour mener cette analyse.

#### **4.3.2.2 Étape 2.2 : Processus d'évaluation du temps de démontage**

Pour évaluer le temps de démontage d'un composant, il faut connaître sa séquence de démontage qui indique les composants à démonter au préalable, leur ordre de démontage et toutes les liaisons à défaire. Connaissant les types de liaisons à défaire et à l'aide des temps standards des actions élémentaires de maintenance, on peut estimer la durée requise pour défaire chacune de ces liaisons. La durée totale de démontage du composant est la somme des durées requises pour démonter toutes les liaisons de la séquence de démontage. En fait, on parle plutôt de séquence de transitions. Une transition est une action de démontage qui sépare un assemblage parent en deux sous-assemblages héritiers. Cette action nécessite évidemment la suppression de toutes les liaisons permettant de réaliser les connexions entre les deux sous-assemblages héritiers. L'évaluation du temps de démontage peut alors être effectuée en suivant les étapes présentées sur la figure 4.7.b (une mise en œuvre de ce processus est présentée au chapitre 5):

- *Étape 2.2.1 : Génération des transitions réalisables.* Cette première étape permet d'identifier toutes les séparations de composants pouvant être réalisées sur le système. Elle peut être effectuée à l'aide d'un algorithme de désassemblage disponible dans la

littérature, par exemples (Lambert, 2003) ou (Zwingmann, 2008). Les transitions obtenues sont généralement représentées sous formes de graphes de transitions ou de matrice de transitions.

- *Étape 2.2.2 : Génération des séquences de transitions possibles pour le démontage de chaque composant.* Cette étape permet d'identifier toutes les combinaisons possibles de transitions menant au démontage de chaque composant. Il existe généralement plusieurs chemins (séquences de transitions) possibles pour démonter un composant. L'identification de tous ces chemins peut être effectuée à l'aide de la théorie des graphes ou d'un algorithme d'exploration de la matrice de transitions (Menye *et al.*, 2008).
- *Étape 2.2.3 : Identification de la séquence optimale.* Après avoir généré toutes les séquences de transitions possibles à l'étape précédente, on évalue, à cette étape, la durée de démontage des liaisons de chaque séquence pour déterminer la séquence optimale. La durée de démontage est la somme des temps de démontage de toutes les liaisons de la séquence. Le temps de démontage d'une liaison peut être estimé par exemple à l'aide des bases de données des temps standards des actions élémentaires de maintenance (Military HandBook – 470A, 1997). La séquence optimale est celle dont la durée totale est la plus petite. C'est elle qui devrait donc être suivie lors du démontage du composant. La détermination de la séquence optimale peut être effectuée à l'aide, par exemples, de la méthode du plus court chemin ou d'un modèle mathématique (Menye *et al.*, 2008).

À la sortie de cette étape, on dispose de la séquence optimale de démontage et d'une estimation du temps de démontage correspondant, pour chaque composant du système.

Le processus de remontage est généralement l'inverse du processus de démontage en ce qui concerne les étapes à suivre (l'ordre de remontage des liaisons). Mais, pour une liaison donnée, la durée de remontage n'est pas forcément la même que celle de démontage, même en utilisant les mêmes ressources matérielles et humaines. Cependant, l'estimation du

temps de remontage peut être effectuée à partir du temps de démontage en le multipliant par un certain coefficient proche ou égal à 1.

#### **4.3.2.3 Étape 2.3 : Processus d'évaluation du temps de remplacement**

Après l'étape de démontage, l'étape de remplacement consiste à retirer le composant défaillant et mettre en place un composant neuf. On peut aussi envisager le cas où le composant défaillant peut être réparé. Dans ce cas, que nous ne considérons pas ici, le temps de réparation doit aussi être pris en compte. Nous ne considérons que le remplacement du composant défaillant par une pièce de rechange neuve. Le temps de remplacement du composant dépend alors uniquement des paramètres tels que son poids, son volume, sa manœuvrabilité, l'appareillage utilisé, l'espace de dégagement disponible, etc. (figure 4.7.c). Ces temps peuvent être estimés à partir, par exemples, de l'expérience, des bases de données ou des avis des experts.

#### **4.3.2.4 Étape 2.4 : Processus d'évaluation du temps de contrôle de bon fonctionnement**

Le processus de contrôle de bon fonctionnement permet de s'assurer que le système fonctionne correctement après avoir remplacé le composant défaillant. La vérification va dépendre de la fonction que doit remplir le composant ou le système. S'il s'agit par exemple d'un outil de fabrication (tour, fraiseuse, etc.), le bon fonctionnement correspondrait à la production des pièces ayant les caractéristiques requises. La définition de la procédure de contrôle de bon fonctionnement a pour données d'entrées : le mode de défaillance, la fonction affectée, le profil d'utilisation, etc. L'évaluation du temps de contrôle de bon fonctionnement peut être effectuée en suivant les étapes de la figure 4.7.d:

- *Étape 2.4.1 : Définition de la procédure et des moyens de contrôle.* Le concepteur peut définir les actions à mener après une défaillance pour vérifier que la fonction du composant au sein du système est bien remplie. Ces actions vont dépendre par exemples du mode de défaillance et de la fonction du système qui a été affectée. Il peut définir aussi les moyens (appareillages) nécessaires pour la mise en œuvre de cette procédure.

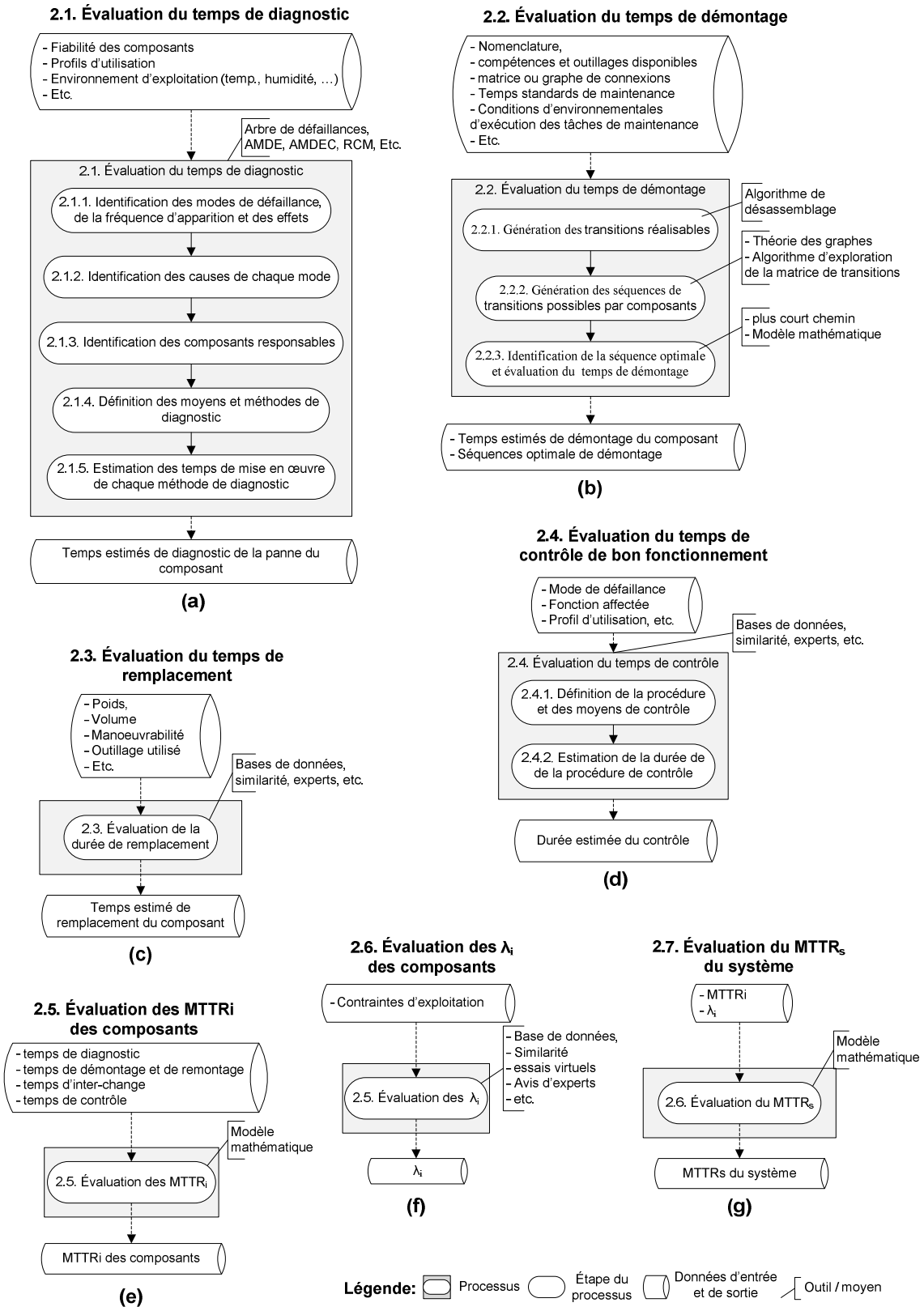


Figure 4.7 Détails des étapes du processus d'évaluation du  $MTTR_s$

- *Étape 2.4.2 : Estimation de la durée des étapes de la procédure de contrôle.* En fonction des moyens utilisés pour exécuter la procédure de contrôle, on peut estimer le temps nécessaire à l'exécution de chaque étape en se basant sur l'expérience, les bases de données de temps ou les avis d'experts.

L'évaluation des durées des étapes de la phase active de maintenance corrective que nous venons de décrire doit être mis en œuvre pour l'ensemble des composants, selon le niveau de décomposition choisi. Ces durées permettent par la suite d'estimer les  $MTTR_i$  des composants.

#### **4.3.2.5 Étape 2.5 : Processus d'évaluation des $MTTR_i$ des composants**

Dans les quatre sous-sections précédentes, nous avons présenté les processus d'évaluation des durées des étapes de la phase active de maintenance corrective. Ces durées constituent les données d'entrée du processus d'évaluation des  $MTTR_i$  des composants (figure 4.7.e). Pour chaque composant  $i$ , le  $MTTR_i$  se calcule facilement en faisant la somme des durées des étapes du processus actif de maintenance corrective du composant, comme l'exprime l'équation (4.2).

#### **4.3.2.6 Étape 2.6 : Processus d'évaluation des taux de panne des composants, $\lambda_i$**

Pour évaluer les taux de panne des composants, le concepteur dispose de plusieurs moyens qu'il peut exploiter selon qu'il s'agisse ou non d'un composant ayant déjà été utilisé dans d'autres systèmes. Dans l'affirmative, les bases de données de fiabilité des composants peuvent être exploitées pour estimer la fiabilité des composants concernés, en tenant compte des conditions d'exploitation. Dans (Smith, 2005) quelques bases de données de fiabilité disponibles dans plusieurs secteurs d'activités sont présentées (tableau 3.6). Si, au contraire, il s'agit d'un composant nouveau, conçu spécifiquement pour la solution, l'estimation du taux panne peut se faire en utilisant d'autres moyens comme la similarité du composant avec d'autres composants existants, les essais virtuels pour estimer le taux de panne ou les avis d'experts (figure 4.7.f).



#### 4.3.2.7 Étape 2.7 : Processus d'évaluation du $MTTR_s$ du système

L'évaluation du  $MTTR_s$  du système (figure 4.7.g) requiert, d'après l'expression (4.1), les  $MTTR_i$  et les taux de pannes  $\lambda_i$  des composants. Les processus d'évaluation de ces paramètres sont décrits ci-dessus. Une fois ces paramètres évalués, l'évaluation du  $MTTR_s$  du système peut donc s'effectuer sans difficultés selon l'expression (4.1). Notons que cette expression suppose une structure série du système.

Le  $MTTR_s$  est l'indicateur de maintenabilité du système que nous avons adopté. Une valeur seuil de cet indicateur,  $MTTR_s^*$ , est définie dans le cahier de charge. Il faut donc comparer par la suite le  $MTTR_s$  évalué et le seuil  $MTTR_s^*$  pour savoir si la solution est acceptable (éligible pour les essais physiques) ou pas. Une solution sera acceptable si  $MTTR_s$  est inférieur ou égal à  $MTTR_s^*$ . Sinon, on passe à l'étape suivante qui permet d'analyser les résultats de l'évaluation afin d'identifier les pistes d'amélioration de la solution.

#### 4.3.3 Étape 3 : Processus d'analyse des résultats de l'évaluation du $MTTR_s$

Le processus d'analyse des résultats d'évaluation du  $MTTR_s$  d'une solution est enclenché si le  $MTTR_s$  obtenu est supérieur au seuil exigé  $MTTR_s^*$ . Ce processus comporte deux étapes (figure 4.8.a) : l'allocation des seuils  $MTTR_i^*$  aux composants et l'identification des composants pénalisant la solution. Ces deux étapes sont présentées ci-dessous.

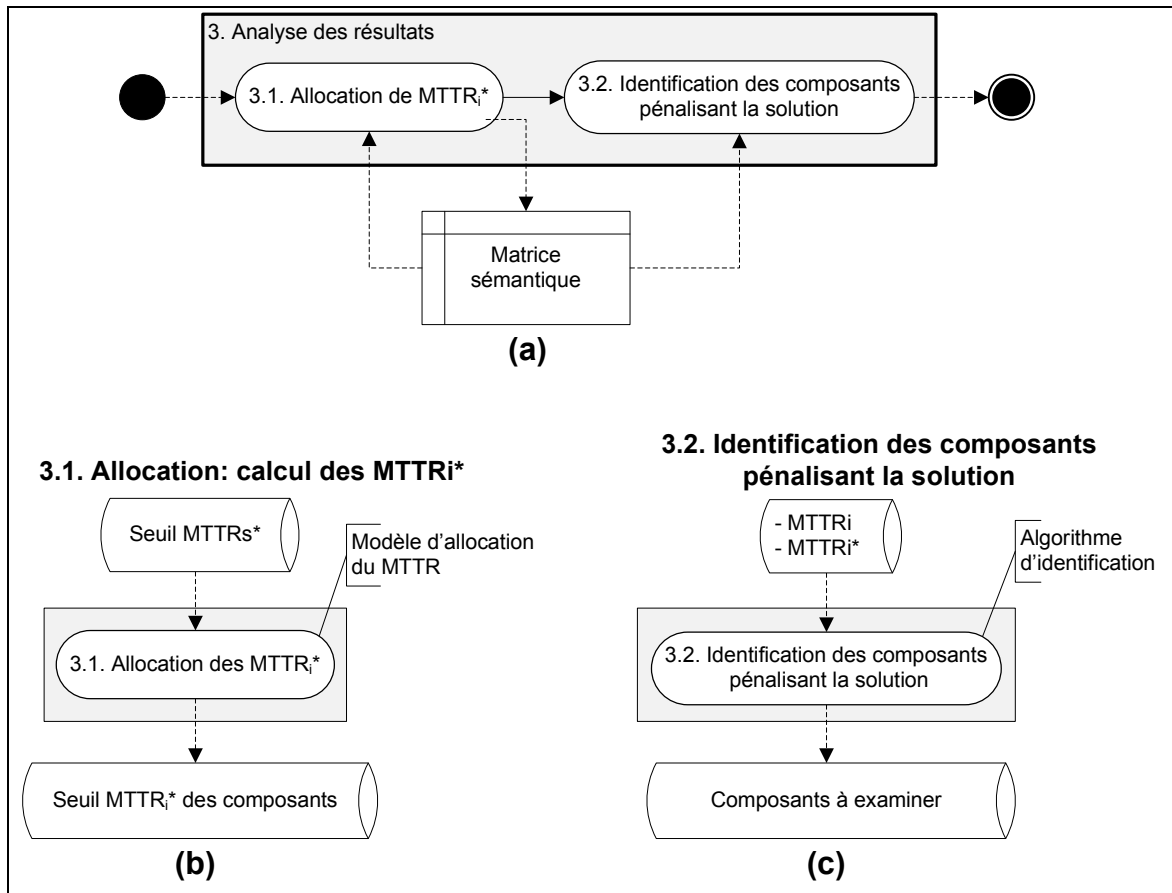


Figure 4.8 Processus d'analyse des résultats et détails de ses étapes

#### 4.3.3.1 Étape 3.1 : Processus d'allocation des $MTTR_i^*$ aux composants

Lorsque le  $MTTR_s$  du système est supérieur au seuil  $MTTR_s^*$  spécifiée dans le cahier des charges, les résultats de l'évaluation doivent être analysés pour identifier les composants qui devraient être modifiés du point de vue maintenabilité. L'allocation des  $MTTR_i^*$  aux composants est la première étape du processus d'analyse des résultats de l'évaluation d'une solution. L'allocation consiste à traduire les exigences de maintenabilité du système vers les niveaux fonctionnels inférieurs (IEC 60706-2, 2006). Cela revient à décliner le seuil  $MTTR_s^*$  sur les composants. Au final on obtient un seuil  $MTTR_i^*$  pour chaque composant (figure 4.8.b). Plusieurs méthodes d'allocation sont disponibles dans la littérature. La plus courante procède à l'allocation proportionnellement aux taux de panne des composants

(IEC/CIE 60706-2, 2006) ou (Military HandBook 470A, 1997). Les  $MTTR_i^*$  sont alors obtenus d'après l'équation (4.3).

$$MTTR_i^* = \frac{\sum_{j=1}^N \lambda_j}{N \lambda_i} MTTR_s^* \quad (4.3)$$

Où N est le nombre de composants du système.

#### 4.3.3.2 Étape 3.2 : Processus d'identification des composants qui pénalisent une solution

Après avoir déterminé les seuils  $MTTR_i^*$  à l'étape précédente, cette deuxième étape (figure 4.8.c) permet d'identifier les composants qui pénalisent la solution évaluée. Ces composants sont définis comme étant ceux pour lesquels le  $MTTR_i$  évalué est supérieur au seuil  $MTTR_i^*$  obtenu par l'allocation. Une procédure d'identification de ces composants est présentée par la figure 4.9. Cette procédure est utilisable uniquement dans le cas spécifique où un seuil est défini pour chaque composant.

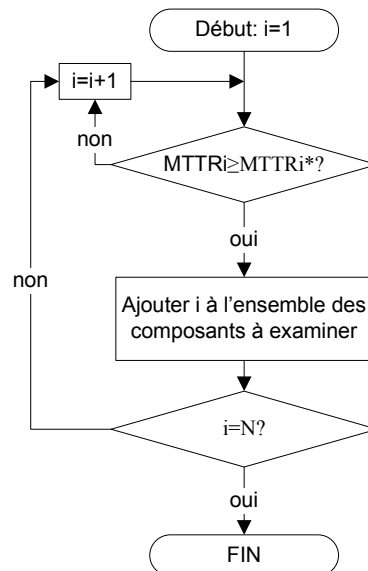


Figure 4.9 Procédure d'identification des composants à améliorer

Il est aussi possible de procéder autrement, sans allocation. La procédure que présente la figure 4.10 peut alors être mise en œuvre. Son principe consiste à modifier, si possible et de façon itérative, le composant dont le produit  $\lambda_k MTTR_k$  est le plus élevé. Si la modification n'est pas possible, on passe au composant suivant. Après chaque modification, on réévalue le  $MTTR_s$  du système qu'on compare à nouveau au seuil  $MTTR_s^*$ . Si l'exigence est satisfaite, la procédure s'arrête. Sinon, on recommence les itérations.

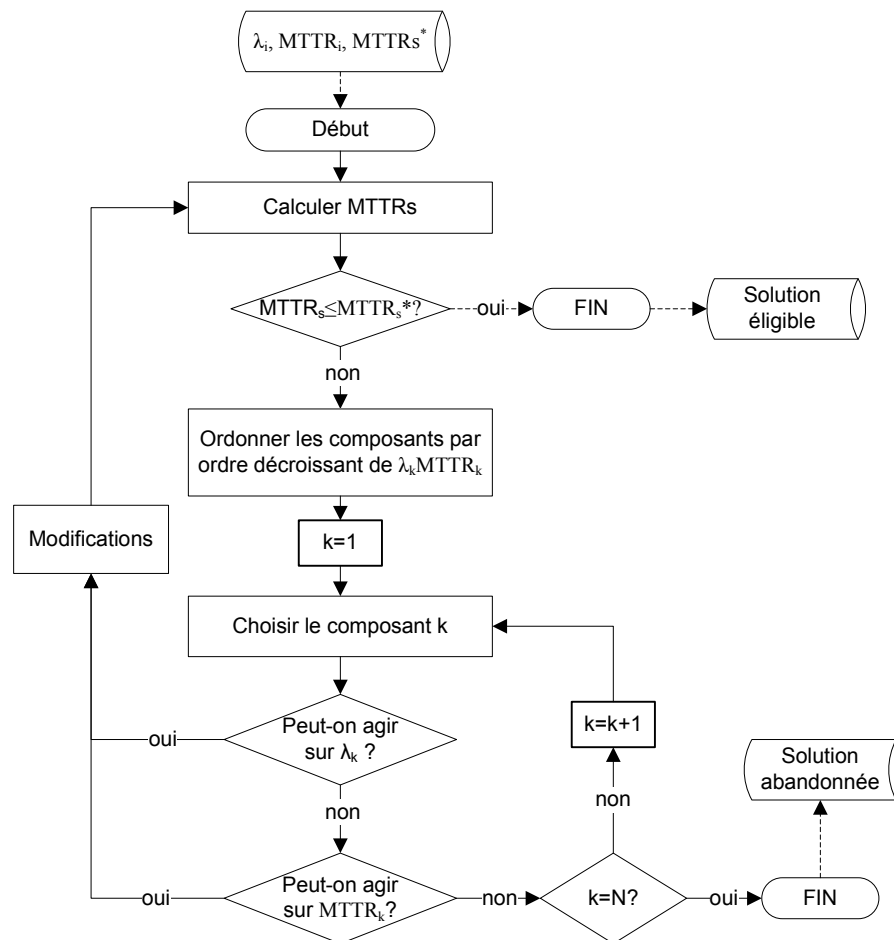


Figure 4.10 Procédure d'amélioration du  $MTTR_s$

Nous avons présenté, dans les sous-sections précédentes, les détails des étapes du processus de validation du  $MTTR_s$  d'une solution. Dans les sous-sections suivantes, nous présentons les étapes du processus de validation du  $UTR_s$  d'une solution.

## 4.4 Processus de validation de $UTR$ en conception

L'indicateur retenu pour la mesure de la disponibilité du système est le *Up Time Ratio* ( $UTR_s$ ). Il est défini par l'expression (4.4). Cette expression montre que l'indicateur  $UTR$  est uniquement fonction de la fiabilité du système, mesurée par la Moyenne des Temps de Bon fonctionnement ( $MTBF_s$ ), et de la maintenabilité, exprimée sous forme de Moyenne des Temps Techniques de Réparation ( $MTTR_s$ ).

$$UTR_s = \frac{MTBF_s}{MTBF_s + MTTR_s} \quad (4.4)$$

L'évaluation de  $UTR_s$  passe donc par l'évaluation du  $MTBF_s$  et celle du  $MTTR_s$ . Or l'évaluation du  $MTTR_s$  vient d'être traitée dans la section précédente. Il ne reste donc plus qu'à présenter le processus d'évaluation le  $MTBF_s$ . C'est l'objet de la sous-section suivante. La figure 4.11 présente l'ensemble des étapes du processus d'évaluation et de validation de  $UTR_s$ , en supposant qu'un seuil  $UTR_s^*$  est défini dans le cahier de charges. Ce processus reprend celui du  $MTTR_s$  auquel s'ajoutent trois nouvelles étapes (présentées en couleur), dont deux dans le processus d'évaluation et une dans le processus d'analyse des résultats.

### 4.4.1 Étape 1 : Processus de collecte des données

Les données requises pour l'évaluation de  $UTR_s$  sont les mêmes que celles requises pour évaluer le  $MTTR_s$  et le  $MTBF_s$ . Les données requises pour évaluer le  $MTTR_s$  sont déjà présentées dans la section précédente. Le  $MTBF_s$ , quant à lui, peut être évalué à partir des taux de pannes des composants,  $\lambda_i$ , en supposant qu'ils sont constants. Or ces taux de pannes font aussi parties des données requises pour l'évaluation du  $MTTR_s$ . Donc, toutes les données nécessaires à l'évaluation de  $UTR_s$  sont exactement celles requises pour évaluer le  $MTTR_s$ . Le processus de collecte des données pour l'évaluation de  $UTR_s$  reste donc

exactement le même que le processus de collecte des données pour l'évaluation du  $MTTR_s$ , décrit dans la section précédente et dont le zoom sur les étapes est fourni par la figure 4.4.

#### **4.4.2 Étape 2 : Processus d'évaluation de $UTR_s$**

D'après l'expression (4.4), pour évaluer  $UTR_s$ , il faut évaluer d'abord  $MTTR_s$  et  $MTBF_s$ . Pour cela, la figure 4.11 indique que neuf sous-étapes (étapes 2.1 à 2.9) doivent être effectuées. Les sept premières sous-étapes sont celle de l'évaluation de  $MTTR_s$ . Elles ont déjà été présentées plus haut dans la section 4.4.2. Ci-dessous, nous détaillons uniquement les deux étapes supplémentaires 2.8 et 2.9.

##### **4.4.2.1 Étapes 2.1 à 2.7 : Évaluation du $MTTR_s$**

(Voir la section 4.3.2)

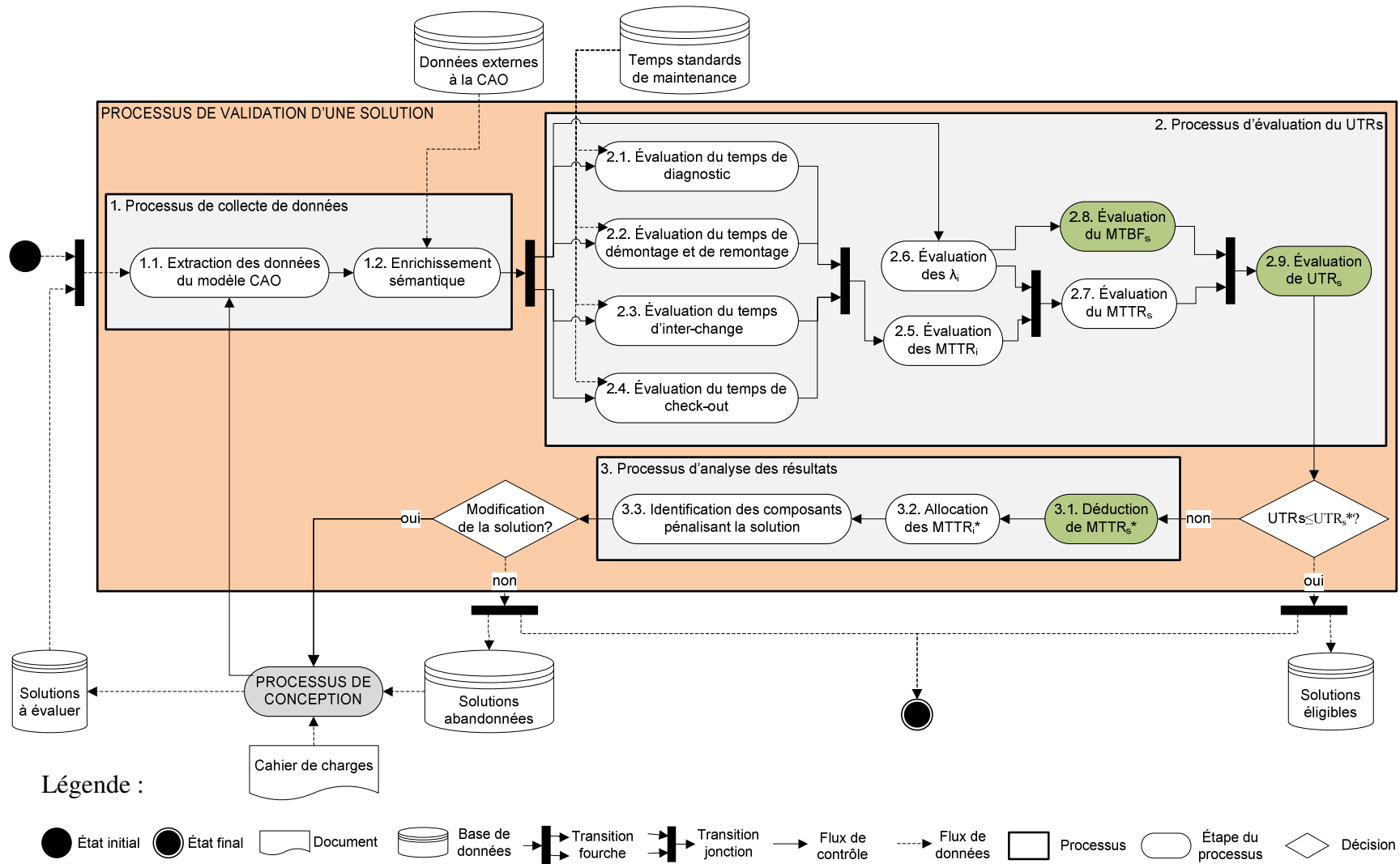


Figure 4.11 Processus intégré d'évaluation et de validation du  $UTR_s$

#### 4.4.2.2 Étape 2.8 : Évaluation du $MTBF_s$

Nous supposons que les taux de pannes des composants, les  $\lambda_i$ , sont constants et que le système a une structure série. Par conséquent, le  $MTBF_s$  du système peut être déduit de l'équation 4.5. Une représentation schématique de cette étape est présentée sur la figure 4.12.a

$$MTBF_s = \frac{1}{\sum_i \lambda_i} \quad (4.5)$$

Où  $\sum_i \lambda_i = \lambda_s$  représente le taux de panne du système.

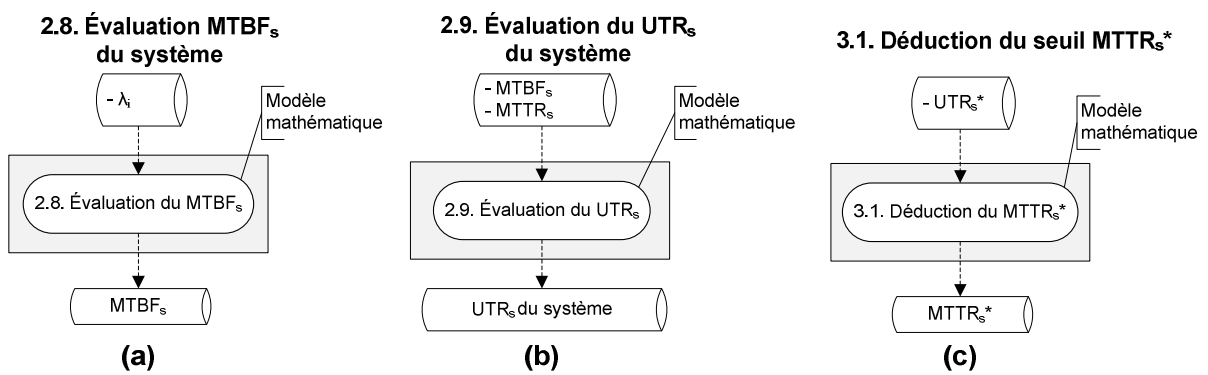


Figure 4.12 Détails des étapes supplémentaires du processus de validation du  $UTR_s$

#### 4.4.2.3 Étape 2.9 : Évaluation du $UTR_s$

L'étape d'évaluation du  $UTR_s$  (figure 12.b) nécessite comme données d'entrée le  $MTTR_s$  et le  $MTBF_s$  qui ont été évalués dans les étapes précédentes. Le modèle mathématique permettant de calculer le  $UTR_s$  d'une solution est l'équation (4.4).



Après avoir calculé le  $UTR_s$  du système, on le compare au seuil  $UTR_s^*$ . La solution sera éligible pour les essais physiques si le  $UTR_s$  est supérieur ou égal à  $UTR_s^*$ . Sinon, on passe à l'étape d'analyse des résultats pour identifier les composants qui pénalisent la solution en vue d'éventuelles modifications.

#### 4.4.3 Étape 3 : Processus d'analyse des résultats de l'évaluation de $UTR_s$

Le processus d'analyse des résultats de l'évaluation du  $UTR_s$  comporte une étape supplémentaire par rapport au processus d'analyse des résultats de l'évaluation du  $MTTR_s$  : *l'étape 3.1 : Déduction du seuil  $MTTR_s^*$*  (figures 4.11 et 4.12.c). Cette étape supplémentaire vient de l'hypothèse selon laquelle les taux de pannes sont constants et donc le  $MTBF_s$  du système est aussi constant. Nous supposons aussi que le  $MTBF_s$  est le meilleur possible. Par conséquent, la maintenabilité, mesurée par le  $MTTR_s$ , devient notre seule variable. Le seuil  $UTR_s^*$  peut alors être transformé facilement en seuil  $MTTR_s^*$  (IEC 60706-2, 2006). Cette transformation ou déduction est faite selon l'équation (4.6). Le seuil  $MTTR_s^*$  obtenu est par la suite traité comme dans la section 4.3.3.

$$MTTR_s^* = \left( \frac{1}{UTR_s^*} - 1 \right) MTBF_s \quad (4.6)$$

Après avoir transformé  $UTR_s^*$  en  $MTTR_s^*$ , le reste du processus d'analyse se déroule comme décrit dans la section 4.3.

## 4.5 Conclusion

Ce chapitre présente une modélisation du processus de validation de la maintenabilité et de la disponibilité en conception, dans le cas particulier où ces caractéristiques sont mesurées respectivement par le MTTR et le UTR. Le processus générique de validation comporte trois sous-processus : la collecte des données, l'évaluation de l'indicateur et l'analyse des résultats. Une décomposition de chacun des trois sous-processus est fournie. La description

détaillée de chaque sous-processus jusqu'aux étapes élémentaires (indécomposables) est aussi faite. Les données d'entrées, leurs sources d'obtention, les données de sorties et les outils à mettre en œuvre dans chaque étape élémentaire sont spécifiés. Dans le cas où il n'y a pas d'exigence, le processus proposé permet au concepteur de faire une évaluation du MTTR ou de UTR de la solution qu'il a générée. Plusieurs outils indispensables (modèles de calculs, algorithmes, etc.) sont disponibles dans la littérature. Mais, d'autres sont encore à développer. Dans cet ordre d'idées, nous proposons au chapitre suivant une méthodologie d'évaluation et d'optimisation du temps de démontage des composants. Cette méthodologie est à mettre en œuvre à l'étape 2.2 du processus d'évaluation du MTTR.

# **Chapitre 5 Optimisation du temps de désassemblage des composants d'un système mécanique en phase de conception**

## **5.1 Introduction**

Au chapitre précédent, le processus d'évaluation du  $MTTR_s$  d'un système en conception a été présenté. Ce processus inclut l'évaluation des durées des phases de diagnostic, de démontage, d'inter-change, de remontage et de vérification du bon fonctionnement (figure 4.3). Les outils ou méthodes permettant d'évaluer certaines de ces durées sont encore à développer. Ce chapitre présente une contribution allant dans ce sens. Il s'agit d'une méthodologie permettant d'évaluation la durée de la phase de démontage des composants (étape 2.2 de la figure 4.3). Une description sommaire de cette méthodologie a été présentée dans la section 4.3.3.3. La méthodologie proposée permet non seulement d'évaluer le temps de démontage des composants, mais aussi de l'optimiser. Une présentation détaillée des étapes de cette méthodologie est fournie dans les lignes qui suivent. Un exemple d'application permet d'illustrer chacune des étapes de la méthodologie.

La suite du chapitre est structurée de la manière suivante : la section 5.2 précise les hypothèses, la section 5.3 présente les cinq étapes de la méthodologie proposée et la section 5.4 présente un exemple d'application pour illustrer la méthodologie et de valider la cohérence des deux modèles mathématiques proposés. La section 5.5 présente une conclusion.

## **5.2 Hypothèses**

Le MTTR est une indication du temps d'inactivité du système dû aux activités de maintenance corrective. Il faudrait donc que ce temps soit le plus bas possible pour qu'un système soit considéré comme ayant un bon niveau de maintenabilité.

**Hypothèse 1** : Nous supposons que **le système a une structure série**. Le  $MTTR_s$  du système est alors calculé selon l'expression (5.1). Cette expression montre que le  $MTTR_s$  du système représente la moyenne pondérée des  $MTTR_i$  des composants avec pour coefficients de pondération les taux de pannes  $\lambda_i$  des mêmes composants.

$$MTTR_s = \frac{\sum_i \lambda_i MTTR_i}{\sum_i \lambda_i} \quad (5.1)$$

**Hypothèse 2** : Dans ce chapitre, nous supposons aussi que **les taux de pannes des composants ( $\lambda_i$ ) sont les plus bas possibles et constants**. Donc, pour minimiser le  $MTTR_s$  du système, il faut agir uniquement sur les  $MTTR_i$  des composants pour les minimiser. Or le  $MTTR_i$  de chaque composant est la somme des durées des étapes de la phase active du processus de maintenance corrective (Military Handbook – 470A, 1997), (Menye *et al.*, 2007) :

- 1) Diagnostic de la panne (localisation et isolation du composant défaillant) ;
- 2) Démontage du composant défaillant ;
- 3) Remplacement ou réparation du composant défaillant ;
- 4) Remontage du composant de rechange ou réparé ;
- 5) Vérification du bon fonctionnement.

Soit  $t_{ik}$  la durée de l'étape  $k$  lors de la maintenance du composant  $i$ . Le  $MTTR_i$  est alors obtenu par l'expression (5.2).

$$MTTR_i = \sum_k t_{ik} \quad (5.2)$$

Donc, pour minimiser les  $MTTR_i$  des composants, il faut minimiser les temps  $t_{ik}$ .

**Hypothèse 3** : Nous supposons que **les durées des autres étapes de la phase active de maintenance sont négligeables devant les durées de démontage et de remontage**. En effet, lors des opérations de maintenance d'un système mécanique, les étapes de démontage et de remontage du composant défaillant comptent parmi celles dont les durées sont souvent les plus élevées. Nous nous intéressons uniquement à ces deux étapes (démontage et remontage) dont on veut minimiser les durées. D'où l'expression (5.3).

$$MTTR_i = t_{\text{démontage de } i} + t_{\text{remontage de } i} \quad (5.3)$$

**Hypothèse 4** : Notre étude concerne uniquement sur le temps de démontage. Mais, nous considérons que **le temps de remontage d'un composant  $i$  peut être déduit du temps de démontage du même composant, par multiplication avec un coefficient  $\beta_i$** . En effet, les déroulements respectifs de ces étapes sont inverses l'un de l'autre. Dans ces conditions, nous calculons le  $MTTR_i$  à partir de l'expression (5.4).

$$MTTR_i = (1 + \beta_i) t_{\text{démontage de } i} \quad (5.4)$$

On peut raisonnablement admettre que les  $\beta_i$  sont en général proche de 1.

Notons que le temps mis pour défaire ou remettre en place les liaisons entre les composants d'un système constitue l'essentiel du temps de démontage ou de remontage des composants lors des opérations de maintenance du système. Le temps de changement d'outils, lorsque requis, est supposé négligeable.

Le temps de démontage d'un composant lors des opérations de maintenance corrective ou préventive dépend de plusieurs paramètres (Military Handbook – 470A, 1997), (IEC 60706-2, 2006):

- les types de liaison entre les composants,
- la séquence de démontage,

- l'outillage utilisé,
- la compétence des opérateurs et,
- les conditions d'exécution des opérations de maintenance.

**Hypothèse 5 : Les opérateurs de maintenance disposent des compétences requises et que les conditions d'exécution des activités de maintenance sont idéales.** Nous nous intéressons donc uniquement aux trois premiers paramètres que nous cherchons à optimiser.

### **5.3 Méthodologie d'optimisation du temps de démontage des composants en conception**

La méthodologie proposée peut être mise en œuvre par le concepteur en phase de conception détaillée du système, lorsque toute la structure de la solution est définie (formes, matériaux, positionnement relatif des composants, etc.), à l'exception des types de liaisons entre les composants. La méthodologie comporte cinq étapes :

- 1) identification des connexions entre les composants du système ;
- 2) définition des types de liaisons possibles par connexion ;
- 3) génération des transitions et des sous-assemblages réalisables lors du démontage ;
- 4) génération des séquences de transitions possibles pour le démontage de chaque composant et;
- 5) sélection optimale des types de liaisons par connexion.

L'étape 2 est indépendante des étapes 3 et 4. Elle peut donc être exécutée en parallèle avec ces deux étapes. La figure 5.1 présente les étapes et leur enchaînement. Les détails de chaque étape sont fournis dans les sous-sections suivantes.

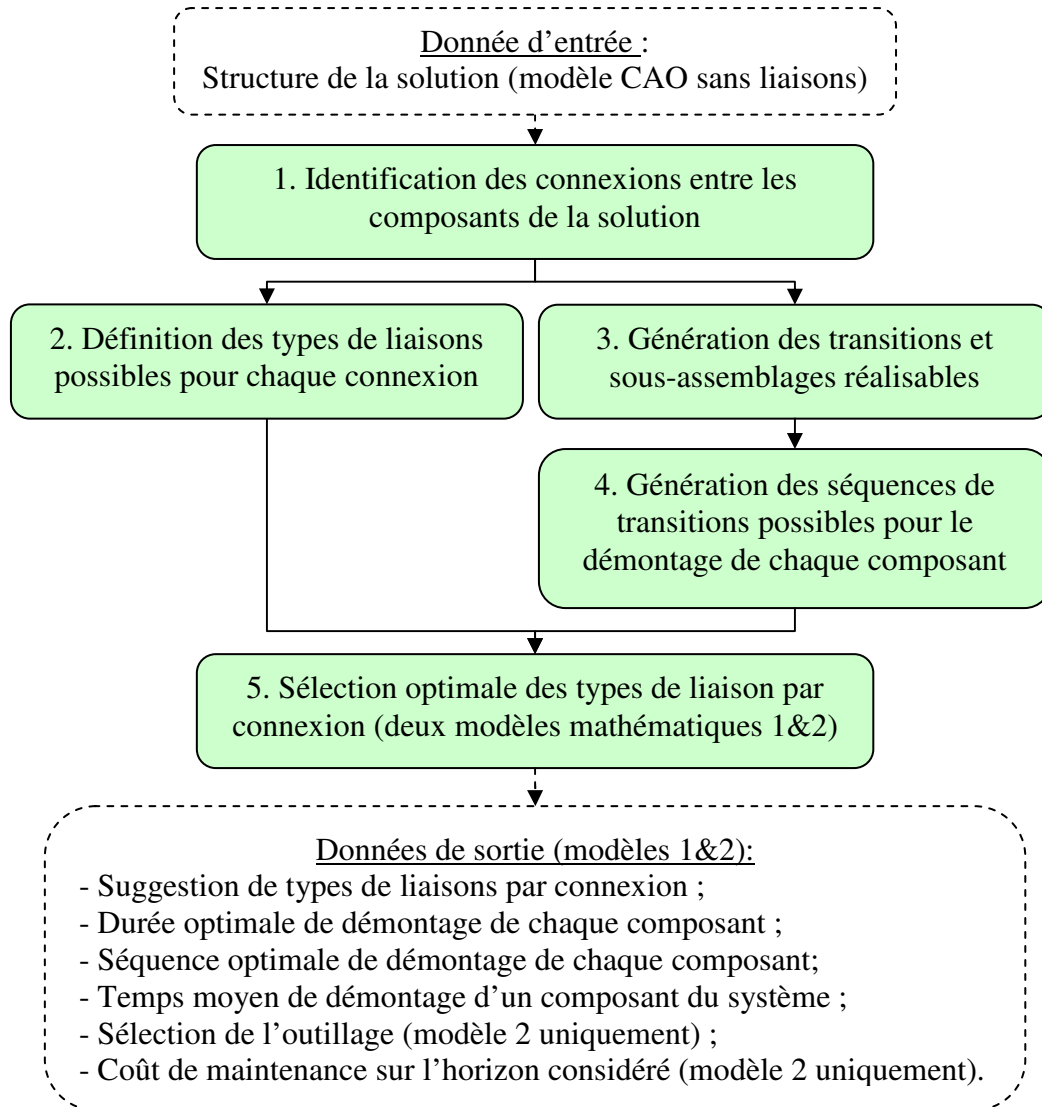


Figure 5.1 Processus d'optimisation du temps de démontage des composants

### 5.3.1 Étape 1 : identification des connexions entre les composants

La démarche que nous proposons peut être mise en œuvre lorsque toute la structure du système est définie à l'exception des types de liaisons entre les composants. À ce stade, le modèle CAO du système permet d'identifier les connexions ou contacts qui existent entre les composants, comme le montre la figure 5.2.a. Ce niveau de définition n'est possible qu'à l'étape de conception détaillée du système. Cette étape suit la conception préliminaire qui consiste à définir et valider le concept produit (AFNOR, 2005). La structure du système

étant donc connue, elle fournit deux types d'informations indispensables pour la mise en œuvre de la démarche : la liste des composants et les connexions entre les composants. L'extraction de ces informations du modèle CAO d'une solution peut se faire manuellement pour des systèmes simples. Pour des systèmes complexes, la liste des composants peut être extraite du modèle CAO de la solution à l'aide du module d'extraction de la nomenclature qui est disponible dans la plupart des logiciels de CAO, par exemples AutoCAD (Autodesk, 2005), CATIA (Tickoo, 2008) ou Pro/Engineer (Lamit, 2008). Les informations sur les connexions entre les composants peuvent être extraites en convertissant le modèle CAO au format STEP (*STandard for the Exchange of Product model data*) avec les protocoles AP-203 et AP-214 (Coulibaly, 2008). Le format STEP est défini par la norme (ISO 10303-1, 1994). Le protocole AP-203 permet d'exporter la liste des composants alors que le protocole AP-214 permet d'exporter les propriétés géométriques (formes, dimensions, tolérances, etc.) et les liaisons topologiques (contact, coaxialité, etc.) entre les composants et les sous-ensembles.

Une fois identifiées, les connexions entre les composants de la solution étudiée peuvent être représentées soit sous forme de graphe de connexions (figure 5.2.b), soit par une matrice de connexions symétrique (figure 5.2.c). Une connexion est représentée par un arc sur un graphe de liaisons et par un « 1 » sur une matrice de connexions.

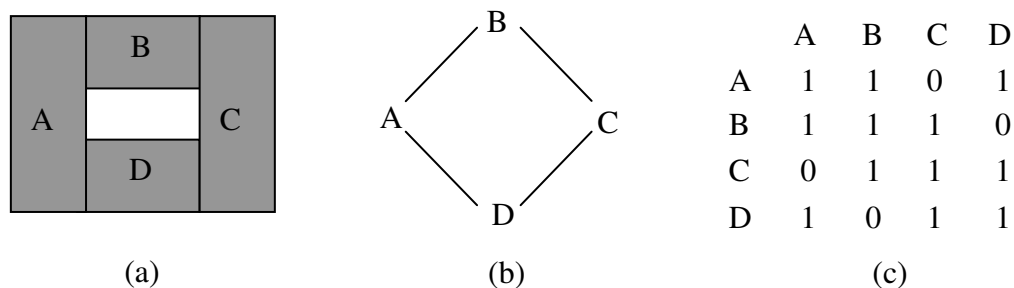


Figure 5.2 Exemple de système à 4 composants :

(a) modèle d'assemblage; (b) graphe de connexions; (c) matrice de connexions.



Après avoir identifié les connexions entre les composants du système, on passe à la deuxième étape qui est la définition des types de liaisons possibles pour réaliser chaque connexion.

### **5.3.2 Étape 2 : définition des types de liaisons et estimation du temps de démontage**

#### **5.3.2.1 Définition des types de liaisons possibles par connexion**

On entend par type de liaison le type d'élément de fixation ou type d'attache utilisé pour réaliser une connexion. Comme exemples de types de liaison, nous avons : les vis à tête standard (CHC, H, etc.), les vis à tête spécifique, les vis/écrou, le sertissage, l'ajustement avec serrage ou jeu, les boulons/contre-écrou, les rivets, les goupilles, la soudure, etc.

Après l'identification des connexions entre les composants du système, le concepteur indique, pour chaque connexion, tous les types de liaison qu'il juge utilisables pour réaliser la connexion considérée. Ces types de liaison peuvent être sélectionnés par exemple à partir d'une base de données de types de liaison. Pour réaliser une connexion, on peut utiliser un seul type de liaison ou une combinaison de plusieurs types de liaisons. On parle alors de liaison mono instance ou de liaison multi-instances (Coulibaly, 2008). On peut aussi utiliser une ou plusieurs fois un même type de liaison pour réaliser une connexion. Toujours d'après (Coulibaly, 2008), on parle dans ce cas de liaison mono ou multi-occurrence. Par exemple, pour assurer la connexion B-C de la figure 5.2, on peut utiliser une ou plusieurs vis standards, une ou plusieurs vis spécifiques, ou tout autre type de liaison que le concepteur juge utilisable pour cette connexion (figure 5.3).

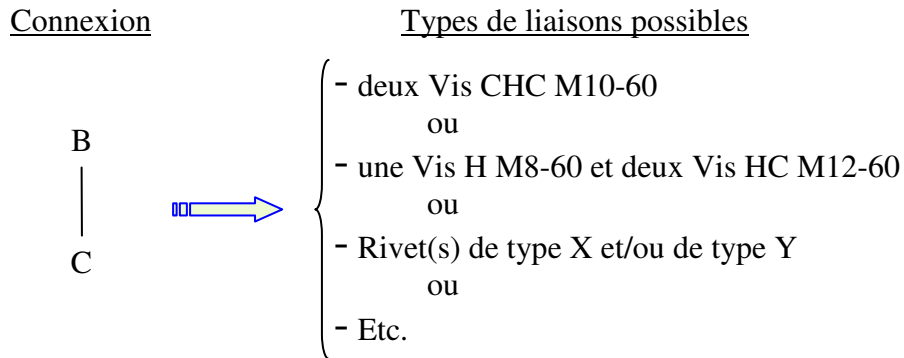


Figure 5.3 Exemple de types de liaisons possibles pour la connexion B-C

Le concepteur doit aussi spécifier, s'il y a lieu, toutes les contraintes associées à l'utilisation de chaque type de liaison possible dans une connexion. Ces contraintes peuvent être dues, par exemple, à la nature des matériaux ou aux fonctionnalités du composant, du sous-assemblage ou même du système. Comme exemple de contrainte, on peut citer l'incompatibilité d'un type de liaison dans une connexion avec un ou plusieurs autres types de liaisons dans d'autres connexions. Ces contraintes sont prises en compte dans les modèles mathématiques de l'étape 5. Pour définir toutes ces informations, le concepteur doit tenir compte des considérations technico-économiques, structurelles et fonctionnelles du système. Son expérience ou les avis d'experts, par exemples, peuvent l'aider dans ce but.

### 5.3.2.2 Estimation du temps de démontage de chaque type de liaison

Pour chaque type de liaison définie, le concepteur doit aussi estimer le temps requis pour le démontage. Le temps de démontage d'un type de liaison dépend de l'outillage utilisé, de la compétence (habileté) de l'opérateur et des conditions (température, précipitation, etc.) d'exécution de l'opération de démontage. Nous supposons que l'opérateur qui va exécuter l'opération de démontage dispose de la compétence requise et que les conditions d'exécution de l'opération sont idéales. La durée de démontage d'une liaison va donc dépendre uniquement de l'outillage utilisé. Le concepteur peut estimer cette durée à partir

du retour d'expérience, de l'avis des experts, de la similarité ou à l'aide des bases de données des temps standards des actions élémentaires de maintenance (Menye *et al.*, 2007). Un exemple de bases de données des temps de maintenance est fourni dans (Military HandBook – 470A, 1997).

À l'étape 5, deux modèles de sélection des types de liaisons sont proposés. Le modèle 1 suppose que l'outillage est déjà sélectionné et donc que la durée de démontage de chaque type de liaison est connue. Par contre, pour le modèle 2, l'outillage à utiliser pour le démontage de chaque type de liaison n'est pas connu à l'avance. Tous les outils pouvant être utilisés pour chaque type de liaison sont définis et la durée de démontage qui découlerait de l'utilisation d'un type outil donné est estimée. La sélection de l'outillage à utiliser est finalement effectuée par le modèle 2, en même temps que s'effectue aussi la sélection des types de liaison. Rappelons que cette étape est indépendante des étapes 3 et 4, mais a pour antécédent l'étape 1. Cela signifie qu'elle peut être réalisée avant ou après les étapes 3 et 4 mais ne peut être réalisée avant l'étape 1.

### **5.3.3 Étape 3 : identification des sous-assemblages et transitions réalisables**

Connaissant la structure de la solution étudiée, les positions relatives de ses composants les uns par rapport aux autres et les connexions entre ces composants, on peut identifier tous les sous-assemblages réalisables lors du démontage des composants du système et générer toutes les transitions correspondantes. Une transition est une action de démontage qui sépare un assemblage parent  $S$  en deux sous-assemblages héritiers  $S_1$  et  $S_2$  (Lambert, 2002). Réaliser une transition revient donc à défaire toutes les liaisons assurant les connexions entre les deux sous-assemblages héritiers  $S_1$  et  $S_2$ . Ces deux sous-assemblages héritiers sont disjoints, c'est-à-dire n'ont aucun composant en commun ( $S_1 \cap S_2 = \emptyset$ ). Par ailleurs, la réunion des deux sous-assemblages héritiers permet de retrouver le sous assemblage parent ( $S_1 \cup S_2 = S$ ). La figure 5.4 présente une illustration de la transition qui sépare l'assemblage parent ABCD en sous-assemblages héritiers AB et CD. Cette transition sera effectuée en démontant les liaisons assurant les connexions A-D et B-C. De même, une

autre transition transformerait l'assemblage parent ABCD en ACD et B comme sous-assemblages héritiers en démontant les liaisons A-B et B-C. Une troisième transition transformerait ACD (parent) en AD et C (héritiers) en brisant la liaison D-C. Les sous-assemblages héritiers doivent être réalisables. Pour un système comportant  $N$  composants, il existe  $2^N - 1$  sous-assemblages théoriques. Mais certains d'entre eux peuvent ne pas être réalisables à cause des contraintes structurelles du système.

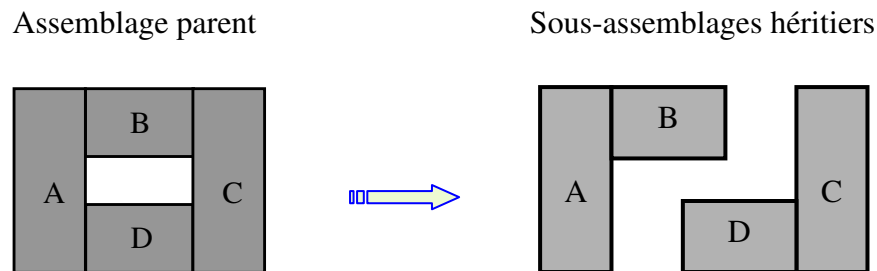


Figure 5.4 Illustration d'une transition

La génération des sous-assemblages et des transitions réalisables s'effectue à l'aide d'un algorithme ou d'un modèle de désassemblage. Plusieurs algorithmes et modèles de désassemblage sont disponibles dans la littérature (Boks *et al.*, 1996), (Chen *et al.*, 1997), (Lambert, 2002), (Lambert, 2003) ou (Zwingmann *et al.*, 2008). Pour un système de  $N$  composants, la plupart de ces modèles doivent examiner les  $2^N - 1$  sous-assemblages théoriques pour trouver les sous-assemblages réalisables. Ce qui constitue un inconvénient lorsque  $N$  devient très grand. De ce point de vue, le modèle proposé dans (Zwingmann *et al.*, 2008) présente un avantage dans la mesure où il examine un nombre réduit de combinaisons en tenant compte des contraintes structurelles du système. C'est donc ce modèle que nous choisissons pour notre démarche. Il procède en trois étapes : génération des sous-assemblages réalisables, génération des transitions réalisables et détermination de la séquence de transition optimale. Seules les deux premières étapes nous intéressent dans notre démarche. Nous les présentons brièvement ci-dessous. La troisième étape de cet algorithme ne nous intéresse pas à ce niveau de notre démarche. Elle pourrait nous

intéresser à l'étape 5, mais ne peut pas être utilisée car elle suppose que les liaisons entre les composants sont déjà définies.

### 5.3.3.1 Identification des sous-assemblages réalisables

Pour identifier les sous-assemblages réalisables, le modèle de (Zwingmann *et al.*, 2008) se base sur la matrice de connexions et les relations de précédence. Les relations de précédence traduisent les contraintes topologiques et géométriques des composants et des sous-assemblages. Ces contraintes vont permettre de dire par exemple que pour extraire le composant D de la figure 5.2.a, il faut avoir extrait le composant A ou le composant C. Les contraintes prennent aussi en compte la direction d'extraction,  $d$ , d'un composant. Par exemple dans le cas planaire de la figure 5.2.a, l'extraction de A ne peut se faire que vers la gauche ( $d = -\bar{x}$ ) alors que l'extraction de C n'est possible que vers la droite ( $d = +\bar{x}$ ). D'autres directions d'extraction peuvent être considérées dans des cas plus complexes. En tenant compte de ces relations de précédence pour tous les composants du système, (Zwingmann *et al.*, 2008) propose un modèle de programmation par contraintes qui permet de générer les sous-assemblages réalisables, sans balayer forcément toutes les  $2^N - 1$  sous-assemblages théoriques. Comme exemples de sous-ensembles réalisables de la figure 5.2.a, on a : ABD, BDC et AB. Par contre, AC et BD ne sont pas des sous-assemblages réalisables car il n'existe aucune connexion entre leurs composants. Connaissant les sous-assemblages réalisables, on peut générer ensuite les transitions permettant de les obtenir.

### 5.3.3.2 Génération des transitions réalisables

Partant de l'ensemble des sous-assemblages réalisables obtenu précédemment le modèle génère toutes les transitions permettant d'obtenir ces sous-assemblages en utilisant aussi la programmation par contraintes. Les transitions sont générées en comparant les sous-assemblages réalisables pour vérifier la présence ou non d'un composant donné et en tenant compte des contraintes structurelles du système. Toutes les transitions générées sont ensuite regroupées dans une matrice de transition. Chaque colonne  $j$  (sauf la première) de cette matrice représente une transition. Les sous-assemblages parents et héritiers dans une transition  $j$  sont identifiés comme suit : le sous-assemblage parent de la transition  $j$  est

celui dont la ligne comporte «-1» à l'intersection avec la colonne  $j$  ; les deux sous-assemblages héritiers sont ceux dont les lignes comportent «1» à l'intersection avec la colonne  $j$ . Les autres sous-assemblages qui ne sont pas concernés par la transition  $j$  ont un «0» ou «.» à l'intersection de leur ligne avec la colonne  $j$  de la matrice de transition. Le tableau 5.1 présente un exemple de matrice de transitions avec une liste non exhaustive de sous-assemblages et des transitions réalisables. Cet exemple est en fait une partie de la matrice de transitions qu'on obtiendrait de la figure 5.2.a. Cette matrice montre bien que seuls trois sous-assemblages sont concernés par chaque transition, sauf pour la transition 00 qui sert à initialiser l'algorithme de résolution. La transition 02 sépare l'assemblage parent ABCD en sous-assembles héritiers AB et CD. C'est cette transition qu'illustre la figure 5.4.

Tableau 5.1 Matrice de transitions

Sous-assemblage réalisable	Transitions					
	00	01	02	03	04	...
ABCD	1	-1	-1	.	.	
ABC	.	1	.	-1	.	
AB	.	.	1	1	.	
CD	.	.	1	.	-1	
A	.	.	.	.	.	
C	.	.	.	1	1	
D	.	1	.	.	1	
...						

Après avoir généré toutes les transitions réalisables, on peut passer à l'étape suivante, étape 4, qui est la génération des séquences de transitions possibles pour le démontage de chaque composant.

### 5.3.4 Étape 4 : génération des séquences de transitions

Pour démonter un composant, il faut effectuer une ou plusieurs transitions successives. Cette série de transitions est communément appelée séquence de transitions ou séquence de

démontage. Généralement, pour démonter un composant, plusieurs séquences de démontage sont possibles. Une analyse de la matrice de transition confirme cette multiplicité de séquences de transitions pour démonter un même composant. Par exemple d'après la matrice de transition présentée au tableau 5.1, le composant D peut être extrait en effectuant la transition 01 ou en effectuant successivement les transitions 02 et 04 (soit la séquence de transitions 02-04).

À partir de la matrice de transitions, on peut générer toutes les séquences de transitions permettant d'extraire chaque composant constituant un sous-assemblage réalisable. Pour générer ces séquences de transitions recherchées, il faut explorer la matrice de transitions soit de façon descendante, de l'assemblage initial vers les composants, soit de façon ascendante, des composants vers l'assemblage initial. Avec la procédure descendante, la matrice de transition est explorée en partant de l'assemblage initial du système (par exemple l'assemblage ABCD de la figure 5.2.a) et en suivant les transitions jusqu'aux composants. La procédure descendante a l'avantage de déterminer les transitions dans l'ordre où elles interviennent dans la séquence. Par contre, les séquences de transitions sont générées en désordre. C'est-à-dire, la génération des séquences ne se fait pas par composant. Si la première séquence trouvée permet de démonter un composant donné, la séquence suivante peut être celle d'un autre composant. Un regroupement des séquences de transitions par composant est donc indispensable à la fin de la procédure descendante. La procédure ascendante quant à elle explore la matrice de transitions en partant des composants et en remontant par les transitions jusqu'à l'assemblage initial. La procédure ascendante permet de déterminer les séquences de transitions directement par composant. Cependant, les transitions d'une séquence sont déterminées dans l'ordre inverse de leur exécution dans la séquence. Cet ordre se corrige plus facilement en plaçant les transitions dans le bon ordre. Nous optons donc pour la procédure ascendante dont les étapes et leur enchaînement sont décrits par la figure 5.5. Au terme de cette procédure, on obtient toutes les séquences de transitions possibles pour extraire le composant analysé. On choisit ensuite un autre composant et on recommence la procédure. Une illustration de la mise en œuvre de cet algorithme est donnée dans la section 5.4.

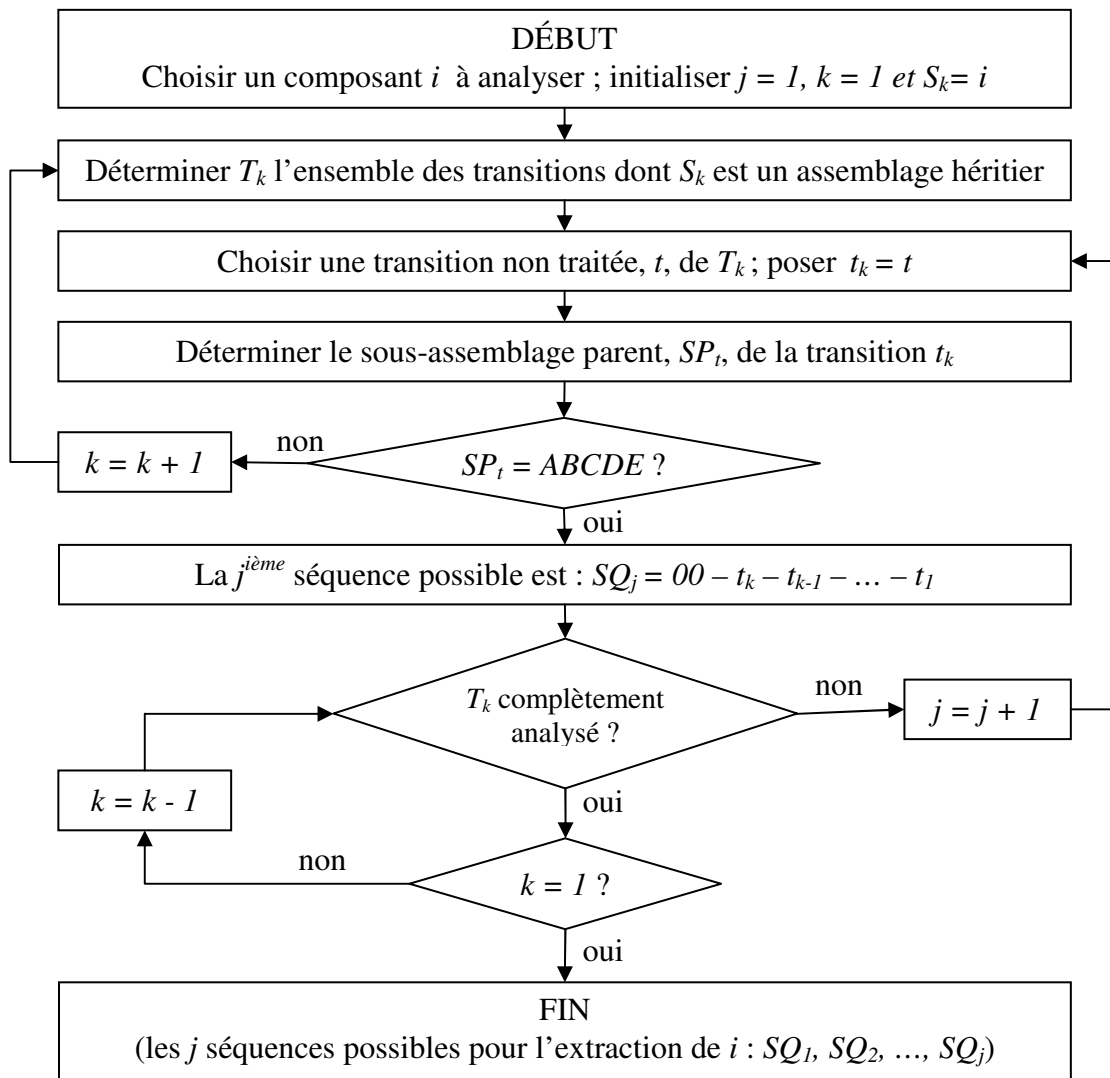


Figure 5.5 Procédure ascendante de détermination des séquences de désassemblage

Après avoir défini les types de liaisons possibles pour réaliser chaque connexion (étape 2) et généré toutes les séquences de transitions pouvant être utilisées pour démonter chaque composant (étape 4), on passe maintenant à la dernière étape de la méthodologie, l'étape 5, où deux modèles mathématiques sont proposés pour sélectionner les types de liaison et l'outillage qui minimisent la durée de démontage des composants.



### 5.3.5 Étape 5 : sélection optimale des types de liaisons

Cette étape exploite les informations issues des étapes précédentes, notamment, des étapes 2 et 4. Le problème à résoudre est la minimisation du temps de démontage de chaque composant du système. Les composantes de ce problème peuvent être résumées en plusieurs niveaux :

1. Démontez un composant quelconque du système, pour ce faire;
2. Plusieurs séquences de démontage sont possibles;
3. Chaque séquence de démontage est une série de transitions à effectuer;
4. Chaque transition représente un ensemble de connexions à défaire;
5. Plusieurs types de liaisons possibles pour réaliser chaque connexion ;
6. Plusieurs outils possibles pour démonter chaque type de liaison.

Un choix doit être effectué aux niveaux 2, 5 et 6 pour minimiser le temps moyen de démontage d'un composant du système. Pour aider le concepteur dans ce choix, deux modèles mathématiques sont proposés. Le premier ne traite que les cinq premiers niveaux du problème, car il suppose que le choix de l'outil est déjà effectué. Il propose donc un choix optimal uniquement pour les niveaux 2 et 5. Le modèle 2, lui, considère les six niveaux et propose donc un choix optimal aux niveaux 2, 5 et 6. Il est à noter que les choix proposés par ces modèles restent des suggestions. C'est le concepteur qui décide du choix final. Les modèles exploitent, en entrée, les données issues des étapes 2 et 4 de la méthodologie, présentées plus haut :

- les types de liaisons utilisables pour chaque connexion ;
- leur durée de démontage qui dépend de l'outil utilisé (qu'il faudrait choisir et acheter) dans le cas spécifique au modèle 2 ;
- les contraintes associées à chaque type de liaison possible, et ;

- les séquences de transitions possibles pour extraire chaque composant du système.

Le modèle 2 prend en compte une contrainte supplémentaire de budget de maintenance sur un horizon donné. Le budget de maintenance considéré comprend trois composantes : le coût de l'outillage, le coût des pièces de rechange et les salaires des opérateurs de maintenance. En sortie, les deux modèles fournissent :

- les types de liaison à utiliser pour réaliser chaque connexion ;
- l'outillage à utiliser pour le démontage de chaque type de liaison sélectionnée (modèle 2 uniquement) ;
- le temps démontage optimal de chaque composant ;
- la séquence de démontage optimale correspondante ;
- le temps moyen de démontage et de remontage d'un composant qui correspond au  $MTTR$  minimum du système, d'après nos hypothèses, et ;
- le coût de maintenance sur l'horizon considéré (modèle 2 uniquement).

Nous présentons ci-dessous de manière détaillée les deux modèles qui supposent que les opérateurs de maintenance disposent des compétences requises et que les opérations de maintenance sont exécutées dans des conditions idéales. Le modèle 1 suppose en plus que l'outillage utilisé pour le démontage de chaque type de liaison est déjà sélectionné et le temps de démontage correspondant connu et constant. Par contre, pour le modèle 2, la sélection de l'outillage pour le démontage de chaque type de liaison possible n'est pas encore effectuée. Plusieurs outils sont donc envisager pour le démontage de chaque type de liaison possible. La durée de démontage découlant de l'utilisation de chaque outil est supposée connue et constante. Le modèle 2 effectue donc aussi la sélection de l'outillage en plus des types de liaisons pour chaque connexion.

**Fonction objectif** : La fonction objectif pour les deux modèles est la minimisation du  $MTTR_s$  du système. D'après nos hypothèses, le  $MTTR_s$  du système correspond au temps

moyen de démontage et de remontage d'un composant. En effet, nous considérons que le démontage et le remontage constituent les composantes dominantes en termes de durées des étapes du processus actif de maintenance corrective. Les durées des autres étapes (diagnostic, remplacement et vérification du bon fonctionnement) sont donc supposées négligeables devant la durée du démontage et du montage. Par ailleurs nous avons admis que la durée de remontage peut être estimée à partir de la durée de démontage, d'où l'expression (5.4). Dans ces conditions, l'expression du  $MTTR_s$  du système est donnée par l'expression (5.5). Le temps de démontage d'un composant  $i$ ,  $t_{\text{démontage de } i}$ , correspond à la durée de la séquence de démontage choisie.  $\beta_i$  est le rapport entre le temps de remontage et le temps de démontage du composant  $i$

$$MTTR_s = \frac{\sum_i \lambda_i (1 + \beta_i) t_{\text{démontage de } i}}{\sum_i \lambda_i} \quad (5.5)$$

### 5.3.5.1 Modèle 1 : modèle de base (sélection des types de liaison, sans contraintes supplémentaires)

#### *Paramètres :*

$N$  : Nombre de composants du système;

$\lambda_i$  : Taux de panne du composant  $i$  ;

$d_{kl}$  : Temps de démontage du type de liaison  $l$  de la connexion  $k$  ;

$m_t$  : Nombre de connexions à défaire pour la transition  $t$  ;

$n_k$  : Nombre de types de liaisons possibles pour la connexion  $k$  ;

$s_i$  : Nombre de séquences de transitions possibles pour le démontage du composant  $i$  ;

$t_{ij}$  : Nombre de transitions dans la séquence possible  $j$  pour le démontage du composant  $i$  ;

$s_{ij}$  : Durée de la séquence de transitions possible  $j$  pour le démontage du composant  $i$  ;

$\beta_i$  : Rapport entre le temps de remontage et le temps de démontage du composant  $i$  .

**Variables :**

$X_{kl}$  : Variable binaire qui vaut 1 si le type de liaison  $l$  est choisi pour la connexion  $k$  , et vaut 0 sinon;

$Y_{ij}$  : Variable binaire qui vaut 1 si la séquence de transitions  $j$  est retenue pour le démontage du composant  $i$  , et vaut 0 sinon.

**Fonction objectif :**

$$\text{Min } Z = \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{s_i} \lambda_i (1 + \beta) s_{ij} Y_{ij} \right) / \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (5.6)$$

**Sujet à :**

*Choix d'un type de liaison  $l$  par connexion  $k$*

$$\sum_{l=1}^{n_k} X_{kl} = 1 \quad \forall k \quad (5.7)$$

*Choix d'une séquence de transitions  $j$  par composant  $i$*

$$\sum_{j=1}^{s_i} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (5.8)$$

*Contraintes spécifiques à la solution étudiée*

(Par exemple les incompatibilités entre les types de liaisons)

*Calcul de la durée de la séquence de transitions  $j$  du composant  $i$*

$$s_{ij} = \sum_{t=1}^{t_{ij}} \sum_{k=1}^{m_t} \sum_{l=1}^{n_k} d_{kl} X_{kl} \quad \forall i, \forall j \quad (5.9)$$

*Binarité*

$$X_{kl} \text{ et } Y_{ij} \text{ binaires} \quad (5.10)$$

Si des contraintes additionnelles, comme des incompatibilités entre certains types de liaisons potentielles, sont spécifiées à l'étape 1, elles doivent être traduites en équations dans la partie du modèle réservée aux contraintes spécifiques du système étudié. Quelques contraintes de ce genre sont spécifiées dans la section 5.4 par les expressions (5.20) et (5.21).

La famille de contraintes (5.7) garantit qu'un seul type de liaison sera sélectionné pour chaque connexion  $k$ . Il est aussi possible d'envisager une combinaison de plusieurs types de liaison dans une même connexion. Ce cas pourrait être pris en compte dans la même contrainte en définissant cette combinaison comme un type complexe de liaison. Les contraintes (5.8) permettent de s'assurer qu'une seule séquence sera retenue parmi les séquences de transitions possibles pour extraire le composant  $i$ . L'expression (5.9) permet de calculer les durées de toutes les séquences de démontage possibles des composants. L'expression (5.10) signifie que les  $X_{kl}$  et  $Y_{ij}$  ne peuvent prendre que les valeurs 1 ou 0.

### **5.3.5.2 Modèle 2 : prise en compte de l'outillage et du budget de maintenance**

***Paramètres :***

$H$  : Horizon d'exploitation;

$B$  : Budget de maintenance;

$N$  : Nombre de composants;

$\lambda_i$  : Taux de panne du composant  $i$ ;

$S_i$  : Ensemble de séquences de transitions possibles pour déposer le composant  $i$  ;

$T_{ij}$  : Ensemble de transitions de la séquence  $j$  pour le dépôt du composant  $i$  ;

$C_t$  : Ensemble de connexions de la transition  $t$  ;

$N_k$  : Ensemble de types de liaisons possibles pour la connexion  $k$  ;

$L_\alpha$  : Ensemble des types de liaison possibles que l'opérateur  $\alpha$  peut démonter et remonter;

$L_r$  : Ensemble des types de liaison possibles que l'outil  $r$  peut aider à démonter et remonter;

$R_{kl}$  : Ensemble des outils pouvant être utilisés pour démonter ou remonter le type de liaison  $l$  de la connexion  $k$  ;

$d_{klr}$  : Temps de démontage du type de liaison  $l$  de la connexion  $k$  avec l'outil  $r$  ;

$\beta_i$  : Rapport entre le temps de remontage et le temps de démontage du composant  $i$  ;

$p_r$  : Coût d'acquisition unitaire de l'outil  $r$  ;

$b_i$  : Coût d'acquisition d'une pièce de rechange du composant  $i$  ;

$c_\alpha$  : Salaire horaire de l'opérateur  $\alpha$  .

**Variables :**

$X_{kl}$  : Variable binaire. Vaut 1 si le type de liaison  $l$  est choisie pour la connexion  $k$  et égale à 0 sinon;

$Y_{ij}$  : Variable binaire. Vaut 1 si la séquence de transitions  $j$  est retenue pour déposer le composant  $i$  . Vaut 0 sinon;

$U_r$ : Variable binaire. Vaut 1 si l'outil  $r$  est retenu et 0 sinon.

**Fonction objectif :**

L'expression de la fonction objectif est la même que pour le modèle 1. Par contre, l'expression de la durée d'une séquence de démontage d'un composant,  $s_{ij}$ , n'est pas la même, comme le montre l'expression (5.17).

$$\text{Min } Z = \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j \in S_i} \lambda_i (1 + \beta_i) s_{ij} Y_{ij} \right) / \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (5.6)$$

**Sujet à :**

*Choix d'un outil par type de liaison sélectionnée*

$$X_{kl} \leq \sum_{r \in R_{kl}} U_r \quad \forall k, \forall l \quad (5.11)$$

$$\sum_{r \in R_{kl}} U_r \leq 1 \quad \forall k, \forall l \quad (5.12)$$

$$U_r \leq \sum_{kl \in L_r} X_{kl} \quad \forall r \quad (5.13)$$

*Choix d'un type de liaison  $l$  par connexion  $k$*

$$\sum_{l=1}^{n_k} X_{kl} = 1 \quad \forall k \quad (5.14)$$

*Choix d'une séquence de transitions par composant  $i$*

$$\sum_{j=1}^{s_i} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (5.15)$$

*Respect du budget de maintenance*

$$C_T \leq B \quad (5.16)$$

*Contraintes spécifiques au système étudié*

(Par exemple les incompatibilités entre les types de liaisons)

*Calcul de la durée de la séquence j de démontage du composant i*

$$s_{ij} = \sum_{l \in T_{ij}} \sum_{k \in C_l} \sum_{l \in N_k} \sum_{r \in R_{kl}} d_{klr} U_r X_{kl} \quad \forall i, \forall j \quad (5.17)$$

*Calcul du coût de maintenance sur l'horizon considéré*

$$C_T = \sum_{\alpha} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in S_i} \sum_{l \in T_{ij}} \sum_{k \in C_l} \sum_{l \in N_k} \sum_{r \in R_{kl}} c_{\alpha} (\lambda_i H) (1 + \beta_i) d_{klr} U_r X_{kl} Y_{ij} + \sum_{i=1}^N b_i (\lambda_i H) + \sum_r p_r U_r \quad (5.18)$$

*Binarité*

$$X_{kl}, Y_{ij} \text{ et } U_r \text{ binaires} \quad (5.19)$$

L'expression (5.11) assure que si aucun des outils permettant de démonter un type de liaison donné n'est sélectionné, alors, ce type de liaison ne peut être sélectionné. L'expression (5.12) garantit qu'au plus, un seul outil sera sélectionné par type de liaison. L'expression (5.13) assure que si un outil est sélectionné, alors, au moins un des types de liaison qu'il permet de démonter doit être sélectionné. L'expression (5.14) permet de s'assurer qu'un seul type de liaison sera choisit pour chaque connexion. L'expression (5.15) garantit le choix d'une seule séquence parmi toutes les séquences possibles de désassemblage de chaque composant. L'expression (5.16) assure le respect du budget prévisionnel de maintenance. Les expressions (5.17) et (5.18) ne sont pas des contraintes, mais, permettent de calculer respectivement les durées de toutes les séquences de démontages des composants et le coût total de maintenance sur l'horizon considéré. Les expressions (5.19) expriment le fait que les variables ne peuvent prendre que les valeurs 0 ou 1. Les contraintes spécifiques sont propres au système étudié. Elles peuvent représenter



par exemple les incompatibilités entre certains types de liaison, comme on le verra dans l'exemple d'application de la section suivante.

## 5.4 Exemple d'application

À titre d'illustration, nous appliquons cette méthodologie à un exemple de système simple (figure 5.6), repris de (Zwingmann *et al.*, 2008). Nous avons choisi cet exemple parce que ses transitions et ses sous-assemblages réalisables sont déjà connus et repris au tableau 5.5. Nous n'apportons aucune contribution à la génération de ces informations. Mais elles sont indispensables à l'étape 3 de notre méthodologie. On aurait donc pu choisir tout autre exemple de système pour lequel ces informations sont disponibles.

Notre système est constitué de cinq composants A, B, C, D et E. La figure 5.6.a montre la structure du système avec toutes les connexions qui existent entre les composants. Aucun type de liaison n'est défini sur cette figure. C'est sur elle que va se baser l'illustration de notre démarche. Par contre, la figure 5.6.b présente une solution possible en termes de choix de types de liaisons pour chaque connexion.

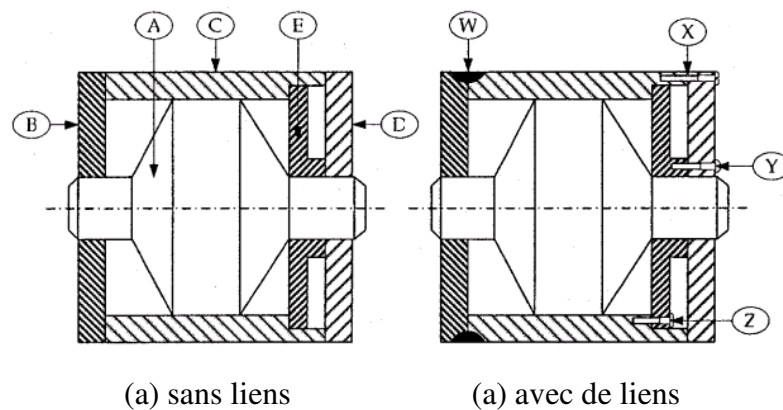


Figure 5.6 Assemblage linéaire

### 5.4.1 Étape 1 : identification des connexions

La structure du système (figure 5.6.a) montre qu'il existe une connexion entre tous les composants, sauf entre B et E et entre B et D. Ce qui se traduit sur le graphe de liaison (figure 5.7.a) par une absence d'arc entre B et E et entre B et D, alors qu'il en existe entre les autres composants. De même, dans la matrice de connexions (figure 5.7.b), il existe un « 0 » à l'intersection de la ligne et de la colonne de B et E et de B et D pour signifier qu'il n'y a pas de connexion entre ces composants. Par contre, il y a un « 1 » dans toutes les autres cases pour signifier qu'il existe une connexion entre les composants concernés. On a donc au total 8 connexions : A-B ; A-C ; A-D ; A-E ; B-C ; C-D ; C-E et D-E.

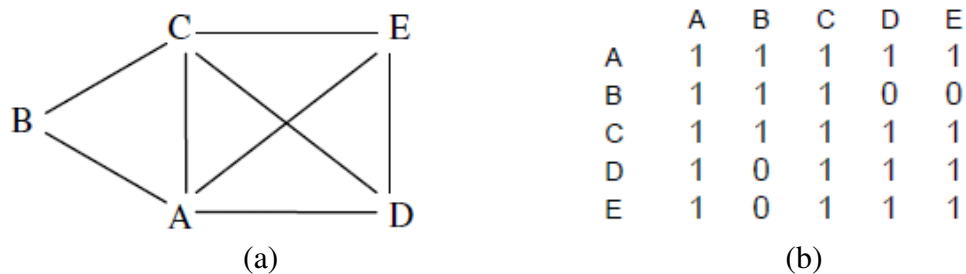


Figure 5.7 Graphe et matrice de connexions

(a) Graphe de connexions; (b) Matrice de connexions

### 5.4.2 Étape 2 : définition des types de liaisons et du temps de démontage

#### 5.4.2.1 Définition des types de liaisons

Dans notre exemple nous avons identifié huit connexions. Le tableau 5.2 indique les types de liaisons possibles pour réaliser chacune des huit connexions et les contraintes éventuelles auxquelles est assujetti chaque type de liaison. Ce tableau montre par exemple qu'un seul type de liaison, un ajustement avec jeu, est jugé possible pour les quatre premières connexions qui sont des connexions entre le composant A et les quatre autres composants. Aucune contrainte supplémentaire ne leur est associée. Pour la connexion 6,

entre les composants C et D, deux types de liaisons sont possibles. La première c'est l'utilisation de trois vis standards n°1. La deuxième possibilité est l'utilisation d'une vis spécifique n°1. Cette deuxième possibilité est assortie d'une contrainte : le choix des deux vis standard n°4 pour assurer la connexion 8, entre les composants D et E. Donc, si la vis spécifique n°1 (variable  $X_{62}$ ) est choisie pour la connexion 6, il faut aussi choisir les deux vis standard n°4 (variable  $X_{81}$ ) pour la connexion 8. Cette contrainte est traduite par l'inéquation (5.20). Pour la connexion 8, trois types de liaisons sont possibles : deux vis standard n°4, une vis spécifique n°2 ou un simple contact plan. Le contact plan est aussi une des trois possibilités de type de liaison pour réaliser la connexion 7, entre les composants C et E. Mais, le choix du contact plan pour la connexion 8 est incompatible avec le choix du contact plan pour la connexion 7. En d'autres termes, le contact plan qui est une possibilité de liaison dans la connexion 7 (variable  $X_{73}$ ) et dans la connexion 8 (variable  $X_{83}$ ) ne doit pas être choisi simultanément pour les deux connexions. Ce qui veut encore dire qu'au plus, une des deux connexions peut être un contact plan. Cette contrainte se traduit par l'inéquation (5.21).

$$X_{62} \leq X_{81} \quad (5.20)$$

$$X_{73} + X_{83} \leq 1 \quad (5.21)$$

Tableau 5.2 Types de liaisons possibles par connexion et contraintes associées

Connexions		Liaisons possibles				
$k$	composants	$l$	types	qté	Variable $X_{kl}$	Contraintes
1	A-B	1	Ajustement avec jeu		$X_{11}$	
2	A-C	1	Ajustement avec jeu		$X_{21}$	
3	A-D	1	Ajustement avec jeu		$X_{31}$	
4	A-E	1	Ajustement avec jeu		$X_{41}$	
5	B-C	1	Soudure		$X_{51}$	
6	C-D	1	Vis standard 1	3	$X_{61}$	
		2	Vis spécifique 1	1	$X_{62}$	D-E vis standard 4
7	C-E	1	Vis standard 2	2	$X_{71}$	
		2	Vis standard 3	1	$X_{72}$	
		3	Contact plan		$X_{73}$	D-E pas contact plan
8	D-E	1	Vis standard 4	2	$X_{81}$	
		2	Vis spécifique 2	1	$X_{82}$	
		3	Contact plan		$X_{83}$	C-E pas contact plan

#### 5.4.2.2 Estimation du temps de démontage des types de liaison

**Pour le modèle 1 :** Le modèle 1 suppose que la durée de démontage de chaque type de liaison potentielle est connue et constante. Le tableau 5.3 fournit ces durées pour tous les types de liaisons potentiels définis ci-dessus. Les durées fournies représentent les durées totales de démontage du nombre d'occurrence (quantité) de la liaison dans la connexion correspondante. Par exemple, la durée totale de démontage des trois vis standard n°1 pouvant assurer la connexion 6, entre les composants C et D, est de 6 unités de temps, soit 2 unités de temps pour démonter chaque vis. Ces durées peuvent provenir des bases de données de temps standards des actions élémentaires de maintenance, des avis d'experts, de l'historique, etc.

Tableau 5.3 Durées de démontage des types de liaison potentiels

Connexions		Liaisons possibles			
$k$	composants	$l$	types	qté	durée ( $d_{kl}$ )
1	A-B	1	Ajustement avec jeu		1
2	A-C	1	Ajustement avec jeu		1
3	A-D	1	Ajustement avec jeu		1
4	A-E	1	Ajustement avec jeu		1
5	B-C	1	soudure		10
6	C-D	1	Vis standard 1	3	$2*3=6$
		2	Vis spécifique 1	1	$4*1=4$
7	C-E	1	Vis standard 2	2	$2*2=4$
		2	Vis standard 3	1	$3*1=3$
		3	Contact plan		1
8	D-E	1	Vis standard 4	2	$2*2=4$
		2	Vis spécifique 2	1	$3*1=3$
		3	Contact plan		1

**Pour le modèle 2 :** Le modèle 2 suppose que la durée de démontage de chaque type de liaison dépend de l'outil utilisé. Le tableau 5.4 présente les types d'outils pouvant être utilisés pour le démontage de chaque type de liaison possible. La durée fournie pour chaque outil représente la durée totale de démontage du nombre d'occurrence du type de liaison concerné. Par exemple, pour le démontage des deux vis standards n°4 pouvant être utilisées pour la connexion 8, entre les composants D et E, trois outils peuvent être utilisés : l'outil 6 avec une durée totale de démontage des deux vis égale à 0.14 unités de temps (soit 0.07 unités de temps par vis); l'outil 10 avec une durée totale de 0.24 unités de temps ou alors l'outil 12 avec une durée totale de 0.06 unités de temps. Certains outils peuvent être candidats au démontage de plusieurs types de liaisons. C'est le cas, par exemple, de l'outil 9 qui est candidat pour le démontage de la vis standard n° 1 (connexion 6) et de la vis standard n° 3 (connexion 7).

Tableau 5.4 Outils potentiels par type de liaison et durée de démontage correspondante

Connexions		Liaisons possibles			Outils $r$ et durée $d_{klr} (r; d_{klr})$
$k$	composants	$l$	types	qté	
1	A-B	1	Ajust. avec jeu		(1; 0.08)
2	A-C	1	Ajust. avec jeu		(1; 0.04)
3	A-D	1	Ajust. avec jeu		(1; 0.06)
4	A-E	1	Ajust. avec jeu		(1; 0.08)
5	B-C	1	Soudure		(2; 0.40)
6	C-D	1	Vis standard 1	3	(3; 0.21) ou (9; 0.30) ou (12; 0.26)
		2	Vis spécifique 1	1	(7; 0.14) ou (11; 0.20)
7	C-E	1	Vis standard 2	2	(4; 0.14) ou (12; 0.16)
		2	Vis standard 3	1	(6; 0.16) ou (9; 0.26) ou (12; 0.16)
		3	Contact plan		(5; 0.02)
8	D-E	1	Vis standard 4	2	(6; 0.14) ou (10; 0.24) ou (12; 0.06)
		2	Vis spécifique 2	1	(8; 0.12) ou (11; 0.16)
		3	Contact plan		(5; 0.02)

### 5.4.3 Étape 3 : identification des sous-assemblages et transitions réalisables

Pour notre exemple, ces informations sont déjà disponibles. Nous les reprenons au tableau 5.5. L'algorithme utilisé pour les générer (Zwingmann *et al.*, 2008) a identifié 16 sous-assemblages et 21 transitions réalisables. Ces données, réorganisées pour une exploitation plus facile, sont présentées dans la matrice de transition que constitue le tableau 5.5. Comme expliqué plus haut, chaque transition fait intervenir un sous assemblage parent et deux sous-assemblages héritiers. Le sous-assemblage parent est celui dont la ligne comporte « -1 » à l'intersection avec la colonne de la transition considérée. Les sous-assemblages héritiers quant à eux sont identifiés par « 1 » à l'intersection de leur ligne avec la colonne de la même transition. Par exemple, la transition 03 transforme l'assemblage parent ABCDE en deux sous-assemblages héritiers AB et CDE et la transition 15 a pour

sous-assemblage parent ACE et pour sous-assemblages héritiers AE et C. Il est à noter que les composants sont des sous-assemblages élémentaires (indivisibles) du système. Donc ils ne peuvent être que des sous-assemblages héritiers des transitions. Par conséquent, leur ligne dans la matrice de connexions ne comprend que des « 1 » et des « . ». La transition 00 permet d'initialiser les calculs du modèle de désassemblage. Cette transition est la première de n'importe quelle séquence du tableau 5.7, bien qu'elle ne soit pas mentionnée. Le tableau 5.6 présente plus simplement les informations contenues dans la matrice de transition : les sous-assemblages parents et héritiers de chaque transition ainsi que les connexions qu'il faut défaire pour séparer le parent en ses deux héritiers. Par exemple, Pour la transition 03, il faut défaire les connexions A-C, A-D, A-E et B-C, dont les numéros sont respectivement 2, 3, 4 et 5.

Tableau 5.5 Matrice de transitions

Ss-assem. réalisable	Transitions																					
	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
ABCDE	1	-1	-1	-1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
ABCE	.	1	.	.	-1	-1	-1	-1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
ACDE	.	.	1	.	.	.	.	.	-1	-1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
ABC	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	-1	-1	-1	.	.	.	.	.	.	.	.	.
ACE	.	.	.	.	.	.	.	1	.	1	.	.	.	-1	-1	-1	.	.	.	.	.	.
CDE	.	.	.	1	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	-1	.	.	.	.	.
AB	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	-1	.	.	.	.
AC	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	1	.	.	.	-1	.	.	.
AE	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	-1	.	.
BC	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-1	.
CE	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	1	.	.	.	.	-1
A	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	1	.	.	1	.	.	.	1	1	1	.	.
B	.	.	1	.	.	.	.	1	.	.	.	1	.	.	.	.	.	1	.	.	1	.
C	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	1	.	.	1	.	1	1
D	.	1	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.
E	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	1	.	1

Tableau 5.6 Connexions, sous-assemblages parent et héritiers des transitions

Transitions		Sous-assemblage		Connexions à supprimer	
(t)	(*)	Parent	héritiers	connexions	n° (k)
01	16	ABCDE	ABCE et D	A-D, C-D, E-D	3, 6, 8
02	13	ABCDE	ACDE et B	A-B, C-B	1, 5
03	04	ABCDE	AB et CDE	A-C, A-D, A-E, B-C	2, 3, 4, 5
04	01	ABCE	AB et CE	A-C, A-E, B-C	2, 4, 5
05	06	ABCE	AE et BC	A-B, A-C, E-C	1, 2, 7
06	15	ABCE	ABC et E	A-E, C-E	4, 7
07	11	ABCE	ACE et B	A-B, C-B	1, 5
08	05	ACDE	A et CDE	A-C, A-D et A-E	2, 3, 4
09	12	ACDE	ACE et D	A-D, C-D et E-D	3, 6, 8
10	07	ABC	A et BC	A-B et A-C	1, 2
11	09	ABC	AC et B	A-B et C-B	1, 5
12	14	ABC	AB et C	A-C et B-C	2, 5
13	02	ACE	A et CE	A-C et A-E	2, 4
14	10	ACE	AC et E	A-E et C-E	4, 7
15	08	ACE	AE et C	A-C et E-C	2, 7
16	03	CDE	CE et D	C-D et E-D	6, 8
17	17	AB	A et B	A-B	1
18	18	AC	A et C	A-C	2
19	19	AE	A et E	A-E	3
20	20	BC	B et C	B-C	5
21	21	CE	C et E	C-E	7

(\*) : Numéro correspondant de la transition dans (Zwingmann *et al.*, 2008)

A partir de ces informations, les séquences de transitions peuvent être générées automatiquement en explorant de façon méthodique la matrice de transitions (tableau 5.5) à l'aide de l'algorithme de la figure 5.5.



#### 5.4.4 Étape 4 : génération des séquences de transitions

En explorant la matrice de transition à l'aide de procédure de la figure 5.5, on obtient toutes les séquences de transitions (ou séquences de démontage) pouvant être utilisées pour le démontage de chaque composant du système. Les séquences obtenues sont présentées dans le tableau 5.7. Une séquence de  $n$  transitions est sous la forme  $t_0 - t_1 - t_2 - \dots - t_n$ , où  $t_k$  est la  $k^{\text{ième}}$  transition de la séquence dans son ordre d'exécution.  $t_0=00$  est la transition d'initialisation (voir tableau 5.5) qui fait théoriquement partie de toutes les séquences mais nous ne l'indiquons pas sur le tableau 5.7. Dans ce qui suit, nous illustrons l'obtention des séquences de démontage du composant D en appliquant la procédure de la figure 5.5.

DEBUT : on choisit donc le composant  $i = D$  ; Initialisation :  $j = 1$ ,  $k = 1$  et  $S_1 = D$ . L'ensemble des transitions dont D est l'un des sous-assemblages héritiers est  $T_1 = \{01; 09; 16\}$  (voir tableau 5.5). On choisit la transition 01 :  $t_1 = 01$ . L'assemblage parent de la transition 01 est  $SP_{01} = ABCDE$ . C'est l'assemblage initial. La première séquence possible pour l'extraction de D est trouvée :  $SQ_1 = 00 - 01$ . C'est la séquence  $Y_{41}$  du tableau 5.7.  $T_1$  complètement analysé ? Non, les transitions 09 et 16 ne sont pas encore traitées.  $j = 1 + 1 = 2$ . On choisit la transition 09 qui devient la nouvelle valeur courante de  $t_1$  :  $t_1 = 09$ . Le sous-assemblage parent de la transition  $t_1 = 09$  est  $SP_{09} = ACDE$ . Il est différent de ABCDE.  $k = 1 + 1 = 2$ . L'ensemble des transitions dont ACDE est l'un des héritiers est  $T_2 = \{02\}$ . On prend  $t_2 = 02$ . Le sous-assemblage parent de  $t_2 = 02$  est  $SP_{02} = ABCDE$ . C'est l'assemblage initial. Une 2<sup>ème</sup> séquence est trouvée :  $SQ_2 = 00 - 02 - 09$ . C'est la séquence  $Y_{43}$  du tableau 5.7.  $T_2$  est complètement analysé ? Oui.  $k = 1$  ? Non,  $k = 2$ . On décrémente  $k$  :  $k = 2 - 1 = 1$ .  $T_1$  complètement analysé ? Non, la transition 16 n'est pas encore traitée.  $j = 2 + 1 = 3$ . Nouvelle valeur de  $t_1$  :  $t_1 = 16$ . Le sous-assemblage parent de la transition 16 est  $SP_{16} = CDE$ . Il est différent de ABCDE.  $k = 1 + 1 = 2$ . L'ensemble des transitions dont CDE est l'un des héritiers est  $T_2 = \{03; 08\}$ . On choisit  $t_2 = 08$ . Le sous-assemblage parent de la transition 08 est  $SP_{08} = ACDE$ . Il est différent de ABCDE.  $k = 2 + 1 = 3$ . L'ensemble des transitions dont ACDE est l'un des



## 5.4.5 Étape 5 : sélection optimale des types de liaisons

### 5.4.5.1 Modèle 1

Pour la fonction objectif, on admet que la durée de remontage est égale à la durée de démontage pour chaque composant, quelque soit la séquence de démontage choisie. Ce qui signifie que  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 1$ .

Pour vérifier la cohérence des résultats du modèle 1, trois cas simples, différenciés par les valeurs de certains paramètres, ont été envisagés.

**Cas 1 :**  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = 0.001$  ; les durées de démontage des types de liaisons sont celles fournies au tableau 5.3 ;

**Cas 2 :**  $\lambda_1 = 0.005$ ,  $\lambda_2 = 0.0001$ ,  $\lambda_3 = 0.0007$ ,  $\lambda_4 = 0.001$ ,  $\lambda_5 = 0.01$  ; les durées des liaisons sont les mêmes qu'au cas 1.

**Cas 3 :** Les taux de panne sont les mêmes qu'au cas 2 ; les durées de démontage des liaisons sont aussi identiques, sauf la durée  $d_{81}$  du premier type de liaison (deux vis standard n°4) utilisable dans la connexion 8 qui augmente. Elle passe de 4 à 5 unités de temps.

Les données des cas 1, 2 et 3 et celles des tableaux 5.3 et 5.7 ont été intégrées dans le modèle 1. Le modèle obtenu a été résolu à l'aide du logiciel d'optimisation LINGO6, développé par Lindo Systems Inc. (Lindo Systems, 1999), (Lindo Systems, 2000). Les résultats obtenus pour ces trois cas sont présentés dans les tableaux 5.8 et 5.9. Le tableau 5.8 montre que le choix des types de liaisons suggérés par le modèle est le même pour les cas 1 et 2. Ce qui est normal car ces deux cas ne diffèrent que par les taux de panne des composants. Ces taux de pannes n'ont d'influence que sur la fonction objectif, le MTTR du système, qui est égale à 26.4 unités de temps pour le cas 1 et 23.9 unités de temps pour le cas 2. La solution respecte bien les contraintes : la vis spécifique n°1 (variable  $X_{62}$ ) est choisie pour la connexion 6 et les deux vis standards n°4 (variable  $X_{81}$ ) sont aussi choisies pour la connexion 8. La contrainte (5.20) est donc bien vérifiée. Par ailleurs, le contact plan

n'a pas été choisi pour la connexion 8, mais, il a été retenu pour la connexion 7. Donc la contrainte (5.21) est aussi vérifiée. On voit aussi que l'augmentation du paramètre  $d_{81}$  au cas 3 modifie la solution qui respecte aussi toutes les contraintes et fournit un MTTR de 25.6 unités de temps.

Tableau 5.8 Résultats du modèle de sélection des types de liaison

Connexions		Liaisons			Choix suggéré par le modèle		
$k$	composants	$l$	type	$X_{kl}$	Cas 1	Cas 2	Cas 3
1	A-B	1	Ajustement avec jeu	$X_{11}$	1	1	1
2	A-C	1	Ajustement avec jeu	$X_{21}$	1	1	1
3	A-D	1	Ajustement avec jeu	$X_{31}$	1	1	1
4	A-E	1	Ajustement avec jeu	$X_{41}$	1	1	1
5	B-C	1	Soudure	$X_{51}$	1	1	1
6	C-D	1	Vis standard 1	$X_{61}$			1
		2	Vis spécifique 1	$X_{62}$	1	1	
7	C-E	1	Vis standard 2	$X_{71}$			
		2	Vis standard 3	$X_{72}$			1
		3	Contact plan	$X_{73}$	1	1	
8	D-E	1	Vis standard 4	$X_{81}$	1	1	
		2	Vis spécifique 2	$X_{82}$			
		3	Contact plan	$X_{83}$			1

Tableau 5.9 Séquences optimales et leur durée

	Cas 1 et 2	Cas 3
<b>A</b>	$s_{12}=s_{13}=13$	$s_{12}=s_{13}=s_{19}=s_{1d}=14$
<b>B</b>	$s_{27}=11$	$s_{27}=11$
<b>C</b>	$s_{31}=s_{32}=s_{35}=s_{38}=s_{3b}=s_{3c}=22$	$s_{31}=s_{32}=s_{35}=s_{38}=s_{3b}=s_{3c}=22$
<b>D</b>	$s_{41}=9$	$s_{41}=8$
<b>E</b>	$s_{53}=11$	$s_{53}=12$

Le tableau 5.9 présente, pour chaque composant, les séquences de transitions optimales qui découlent de la solution obtenue dans chaque cas. Évidemment, les cas 1 et 2 fournissent les mêmes résultats, car les durées des types de liaisons sont identiques. Pour les composants A et C plusieurs séquences sont optimales dans chaque cas. Par exemple, les séquences  $Y_{12}$  et  $Y_{13}$  sont toutes les deux optimales dans chaque cas, mais avec des durées totales différentes : 13 unités de temps pour le cas 1 et le cas 2 et 14 unités de temps pour le cas 3. Le fait d'avoir plusieurs séquences optimales offre une certaine flexibilité au concepteur pour sa décision finale. Cela peut aussi constituer un avantage lors du choix de l'outillage de maintenance par exemple.

#### 5.4.5.2 Modèle 2 :

Comme pour le modèle 1, on suppose que le temps de remontage d'un composant est égal à son temps de démontage, donc que  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 1$ .

Les tableaux 5.10, 5.11 et 5.12 présentent les données complémentaires nécessaires à l'exécution du modèle 2. Le tableau 5.10 présente les coûts unitaires des outils. On suppose que deux opérateurs ayant des compétences complémentaires sont requis pour l'exécution des tâches de maintenance. Le tableau 5.11 présente les taux de pannes des cinq composants A, B, C, D et E, les coûts unitaires des pièces de rechange et le nombre de pièces de rechange requis sur un horizon de  $H=20\ 000$  heures de fonctionnement, soit par exemple 5 ans à raison de 16h par jour, 250 jours par an. Le nombre de pièces de rechange est obtenu en multipliant le taux de panne par l'horizon. Le tableau 5.12 présente les salaires horaires des deux opérateurs et les types de liaisons qu'ils peuvent démonter. Pour la contrainte de budget de maintenance, quatre cas ont été envisagés : sans budget (illimité); budget=6300\$; budget=5900\$ et budget=5800\$.

Tableau 5.10 Coût d'achat unitaire des outils

Outil $r$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a=10	b=11	c=12
Variable $U_r$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_7$	$U_8$	$U_9$	$U_a$	$U_b$	$U_c$
Coût $p_r$ (\$)	200	400	90	80	100	340	100	110	320	120	400	1000

Tableau 5.11 Taux de panne des composants, nombre et coûts des pièces de rechange

	<b>A (<math>i = 1</math>)</b>	<b>B (<math>i = 2</math>)</b>	<b>C (<math>i = 3</math>)</b>	<b>D (<math>i = 4</math>)</b>	<b>E (<math>i = 5</math>)</b>
$\lambda_i$ (en pannes/h)	0.005	0.0001	0.0007	0.001	0.01
<b>Nbre de PdR sur l'horizon</b>	100	2	14	20	200
<b>Coût unitaire (<math>b_i</math>) (en \$)</b>	14	400	180	120	8

Tableau 5.12 Salaires horaires et tâches alloués aux opérateurs

	<b>Salaire horaire <math>c_\alpha</math></b>	<b>Tâches (types de liaisons dont le démontage requiert les compétences de l'opérateur)</b>
<b>Opérateur H1 (<math>\alpha = 1</math>)</b>	20\$/h	11, 21, 31, 41, 61, 71, 72, 73, 81, 83
<b>Opérateur H2 (<math>\alpha = 2</math>)</b>	25\$/h	51, 62, 82

Toutes ces données (tableaux 5.4, 5.7, 5.10, 5.11 et 5.12) ont été intégrées au modèle 2. Le modèle qui en découle a aussi été résolu à l'aide du logiciel d'optimisation LINGO6. Les tableaux 5.13 et 5.14 présentent les résultats obtenus. Pour les connexions 1 à 5, le problème de choix ne se posait pas, que ce soit pour les types de liaisons ou pour les outils. Le choix était requis pour les connexions 6, 7 et 8. Le modèle a donc fait des suggestions de choix pour ces trois connexions (tableau 5.13). Pour le cas 1, il n'y a pas de contrainte de budget. Les types de liaison et les outils proposés par le modèle pour les connexions 6, 7 et 8 sont respectivement les vis spécifique 1 avec l'outil 7, le contact plan avec l'outil 5 et la vis standard 4 avec l'outil 12. Le MTTR obtenu est de 0.81h. Il est le plus bas possible dans cette configuration. Le coût total correspondant est de 6339.92\$. Il est à noter que la solution obtenue pour ce cas sera la même pour un budget supérieur ou égal à 6339.92\$. Au cas 2, le budget est de 6300\$. Le choix des types de liaison reste le même, mais l'outil 12 est remplacé par l'outil 6. Ce qui augmente le MTTR à 0,96 h. De façon générale, on constate dans cet exemple que, plus le budget diminue, plus le MTTR augmente. Bien

qu'on s'y attende un peu, cette situation ne saurait cependant être généralisée. Mais, en dessous d'un budget de 5793.40\$ le modèle ne trouve pas de solution réalisable.

Le tableau 5.14 présente les séquences optimales de démontage de chaque composant. Pour le composant C ( $i = 3$ ), plusieurs séquences sont optimales dans chaque cas. Il s'agit des séquences  $j = 1$ ,  $j = 2$ ,  $j = 5$ ,  $j = 8$  et  $j = 12$  (voir tableau 5.7). Leurs durées respectives sont  $s_{31}$ ,  $s_{32}$ ,  $s_{35}$ ,  $s_{38}$  et  $s_{3c}$ . Elles valent toutes 0.80h, 0.88h, 0.93h et 0.95h respectivement pour les cas 1, 2, 3 et 4.

Tableau 5.13 Résultats du modèle

Connexion		Type de liaisons possibles		Cas 1 : Sans budget		Cas 2 : Budget = 6300\$		Cas 3 : Budget =5900\$		Cas 4 : Budget =5800\$	
				liaison	outil	liaison	outil	liaison	outil	liaison	outil
1	A-B	1	Ajust. avec jeu	1	1	1	1	1	1	1	1
2	A-C	1	Ajust. avec jeu	1	1	1	1	1	1	1	1
3	A-D	1	Ajust. avec jeu	1	1	1	1	1	1	1	1
4	A-E	1	Ajust. avec jeu	1	1	1	1	1	1	1	1
5	B-C	1	soudure	1	2	1	1	1	2	1	2
6	C-D	1	Vis standard 1					1	3	1	3
		2	Vis spécifique 1	1	7	1	7				
7	C-E	1	Vis standard 2							1	4
		2	Vis standard 3								
		3	Contact plan	1	5	1	5	1	5		
8	D-E	1	Vis standard 4	1	c=12	1	6				
		2	Vis spécifique 2					1	8		
		3	Contact plan							1	5
<b>MTTR (en heure)</b>				<b>0.81</b>		<b>0.96</b>		<b>1.06</b>		<b>1.08</b>	
<b>Coût total (en \$)</b>				<b>6339.92</b>		<b>5947.12</b>		<b>5860.76</b>		<b>5793.40</b>	
Coût outillage (en \$)				1800.00		1140.00		900.00		870.00	
Salaire des opérateurs (en \$)				1459.92		1727.12		1880.7		1843.40	
Coût PdR (en \$)				3080.00		3080.00		3080.00		3080.00	

Tableau 5.14 Séquences optimales et leur durée

	Cas 1 :	Cas 2 :	Cas 3 :	Cas 4 :
A	$s_{12} = 0.46$	$s_{12} = 0.54$	$s_{12} = 0.59$	$s_{12} = 0.61$
B	$s_{27} = 0.48$	$s_{27} = 0.48$	$s_{27} = 0.48$	$s_{27} = 0.48$
C	$s_{3b} = 0.80$	$s_{31} = 0.88$	$s_{31} = 0.93$	$s_{31} = 0.95$
D	$s_{41} = 0.26$	$s_{41} = 0.34$	$s_{41} = 0.39$	$s_{41} = 0.29$
E	$s_{53} = 0.36$	$s_{53} = 0.44$	$s_{53} = 0.49$	$s_{53} = 0.51$

## 5.5 Conclusion

Ce chapitre présente une méthodologie permettant au concepteur d'évaluer et d'optimiser le temps de démontage des composants d'un système mécanique en phase de conception. Cette démarche peut être mise en œuvre au stade de la conception détaillée lors que toute la structure du système est déjà définie, sauf les types de liaisons entre les composants. La mise en œuvre de cette méthodologie va alors inciter le concepteur à définir tous les types de liaisons pouvant être utilisés pour réaliser chaque connexion entre deux composants du système. Il va aussi définir, s'il le faut, les outils pouvant être utilisés pour le démontage. Les modèles mathématiques proposés vont lui suggérer d'une part, les types de liaisons à utiliser pour chaque connexion et d'autre part, l'outillage à utiliser pour minimiser le temps de démontage des composants. La sélection peut se faire sous une contrainte de budget de maintenance sur un horizon donné. Les modèles proposés sont des modèles de programmation non linéaires avec des variables binaires. Leur résolution n'est pas facile pour des problèmes de grande taille. Il faudrait donc les adapter aux problèmes de grande taille en utilisant d'autres approches comme la programmation par contraintes.

Ce chapitre a montré que l'outillage utilisé pouvait influencer le temps de démontage et donc le MTTR d'un système. D'autres facteurs liés au contexte d'exploitation ont aussi une influence sur la maintenabilité et la disponibilité du système. Il s'agit par exemple de la compétence et du nombre d'opérateurs de maintenance, des conditions d'exécution des opérations de maintenance, des procédures logistiques et administratives mises en place,



etc. Pour que le niveau de maintenabilité ou de disponibilité annoncé en sortie de la phase de conception soit effectivement atteint en exploitation, il faut que le contexte d'exploitation soit pris en compte en conception. Pour ce faire, le concepteur peut adopter une des deux approches suivantes : soit, adapter le système à son contexte d'exploitation, par exemple, en n'utilisant que les technologies dont la maintenance est facile dans ce contexte, soit, adapter le contexte d'exploitation au système en définissant les recommandations à mettre en place dans ce contexte, par exemple l'outillage à utiliser pour la maintenance. Le chapitre qui suit présente une contribution allant dans le sens de la deuxième approche. Il présente en effet une méthodologie permettant au concepteur de définir les recommandations en termes de nombre et de compétences des opérateurs qui devront être chargés de la maintenance du système dans son contexte d'exploitation.

## **Chapitre 6 Définition des besoins en ressources humaines pour la maintenance d'un système en phase de conception**

### **6.1 Introduction**

En sortie de la phase de conception, les caractéristiques et les performances annoncées d'un système ne sont pas toujours celles qu'il affiche en phase d'exploitation. En effet, les caractéristiques et les performances annoncées du système en sortie de la conception sont celles qu'il aurait dans un contexte idéal d'exploitation. Mais, le contexte réel d'exploitation du système est souvent très loin d'être idéal. D'où les écarts entre les caractéristiques ou les performances annoncées et les caractéristiques ou les performances réelles en exploitation. Pour diminuer ces écarts, deux solutions s'offrent au concepteur. La première est la prise en compte, en phase de conception, du contexte réel d'exploitation du système, s'il est connu, pour que le système soit adapté à ce contexte. La deuxième solution est la définition des conditions d'exploitation qui vont permettre d'atteindre les performances annoncées. Ces conditions sont alors présentées à l'utilisateur final sous forme de recommandations à mettre en place dans le contexte d'exploitation du système. Le contenu de ce chapitre s'inscrit dans la logique de la deuxième solution où le concepteur doit définir les recommandations à mettre en place dans le lieu d'exploitation du système pour que les caractéristiques annoncées soient réellement obtenues. La caractéristique considérée ici est la disponibilité du système. Et les recommandations à formuler portent sur le nombre et les compétences des opérateurs de maintenance. Une méthodologie en deux étapes permettant au concepteur de formuler ces recommandations est présentée.

Le chapitre est structuré comme suit : la section 6.2 présente d'abord quelques facteurs contextuels ayant une influence sur la disponibilité, puis, montre brièvement l'enjeu du facteur ressources humaines pour la maintenance; une méthodologie de définition des besoins en opérateurs de maintenance est présentée à la section 6.3. La section 6.4 présente un exemple simple pour illustrer les approches de résolution et valider la cohérence des modèles. La section 6.5 présente une conclusion.

## **6.2 Facteurs contextuels influençant la disponibilité et enjeux des ressources humaines**

### **6.2.1 Facteurs contextuels influençant la disponibilité**

Parmi les facteurs contextuels (les caractéristiques du milieu d'exploitation) qui ont une influence sur la disponibilité du système, on peut citer (DOD, 2005):

- les compétences et le nombre d'opérateurs de maintenance disponibles ;
- l'environnement (température, saison, situation géographique, vibrations, etc.);
- la disponibilité des pièces de rechange et de l'outillage;
- la qualité et la disponibilité de la documentation;
- la politique de maintenance;
- le profil d'utilisation;
- les procédures administratives mises en place;
- etc.

Chacun de ces facteurs peut avoir une influence sur un ou plusieurs des paramètres suivants dont l'aggravation contribue à la diminution de la disponibilité du système : la fréquence des pannes, la fréquence des activités de maintenance préventive, la durée des activités de maintenance (préventive et corrective) ou les temps d'attentes logistiques et administratifs (Military Handbook – 310, 1997), (Military Standard – 810F, 2000), (NSWC-07, 2007).

### **6.2.2 Enjeux des ressources humaines pour la maintenance**

Le nombre et la compétence des opérateurs de maintenance est le facteur contextuel qui nous intéresse dans le cadre de cette étude. En plus d'avoir une influence sur la disponibilité du système, ce facteur influence aussi le coût des activités de maintenance. En effet, si le nombre d'opérateurs de maintenance est sous estimé, l'équipe de maintenance

sera surchargée et le temps d'attente de maintenance du système sera plus long. Cela aura pour effet de diminuer la disponibilité du système. Si la compétence des opérateurs n'est pas suffisante, les tâches de maintenance seront mal exécutées et cela affectera la fiabilité du système qui tombera plus fréquemment en panne. Cela aura aussi pour effet de diminuer sa disponibilité. Si, à l'opposé, le nombre d'opérateurs de maintenance est surestimé ou si les opérateurs sont surqualifiés, cela aura pour effet d'augmenter inutilement la masse salariale. Il est donc important de déterminer de façon adéquate, en sortie de la phase de conception du système, les besoins en nombre et en compétences des opérateurs de maintenance qui vont aider à atteindre, en phase d'exploitation du système, le niveau de disponibilité attendu, et ce, à moindre coût.

## **6.3 Méthodologie de définition des besoins en ressources humaines pour la maintenance**

### **6.3.1 Étape 1 : Identification des profils D'opérateurs de maintenance**

#### **6.3.1.1 Définitions et hypothèses**

Dans cette première étape, nous cherchons à définir les profils d'opérateurs qui doivent constituer l'équipe de maintenance du système en cours de conception. Pour une meilleure compréhension de la démarche, nous précisons d'abord le sens de certains termes clés. Les définitions citées sont issues de *Le nouveau Petit Robert de la langue française 2009*.

***Discipline, domaine*** ou ***spécialité*** : « branche de la connaissance, des études » (par exemples la mécanique ou l'électricité);

***Qualification*** : « ensemble des aptitudes et des connaissances acquises d'un travailleur pour l'exercice d'une activité de production ». Comme adaptation de cette définition au contexte de ce chapitre, nous désignons par **qualification**, l'ensemble des formations professionnelles acquises dans une discipline par un opérateur (mécanicien ou électronicien par exemple);

**Compétence** : « connaissance approfondie, reconnue, qui confère le droit de juger ou de décider en certaines matières » Dans le cadre de cette étude, le mot compétence désigne l'aptitude ou l'habileté professionnelle reconnue d'un opérateur, dans l'exécution d'une tâche d'une discipline donnée;

**Profil** : «Esquisse psychologique d'un individu quant aux aptitudes professionnelles». D'après le portail lexical du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL) en ligne, une définition du mot profil est l'ensemble des caractéristiques nécessaires à une personne pour exercer une activité, un emploi. Comme déclinaison dans cette étude, le terme profil désigne l'ensemble des qualifications d'un opérateur. Un profil peut être spécialisé (qualifié dans une seule discipline) ou polyvalent (qualifié dans plusieurs disciplines). Plusieurs opérateurs peuvent avoir le même profil mais, avec des niveaux de qualification différents.

La définition des profils d'opérateurs de maintenance se base sur les compétences requises pour exécuter les tâches de maintenance sur le système. Nous supposons que ces tâches sont déjà définies par le concepteur. En effet, au terme du processus de conception d'un système, le concepteur est en mesure de fournir une liste des tâches de maintenance à exécuter sur le système, ainsi que leur fréquence d'exécution pendant la phase d'exploitation. La définition des tâches de maintenance est possible grâce aux caractéristiques inhérentes au système (fiabilité et taux de panne des composants, types de liaisons entre les composants, les matériaux utilisés, etc.) et aux caractéristiques du contexte d'utilisation (profil d'utilisation, température, précipitation, saison, vibration, etc.). Quelques sources d'obtention de certaines de ces données au stade de la conception sont fournies dans (Menye *et al.*, 2007). Comme sources possibles d'obtention des taux de pannes des composants, on a par exemples, les bases de données de fiabilité utilisées dans certains secteurs d'activités (Smith, 2005), le retour d'expérience ou les avis d'experts. Chaque tâche définie peut être rattachée à au plus une spécialité. Les tâches peuvent donc être classées en deux catégories : les tâches spécialisées, qui exigent des compétences dans une discipline précise (mécanique, électromécanique ou électricité par exemple) et les tâches non spécialisées qui n'exigent aucune compétence technologique (nettoyage,

manutention, etc.). On suppose que chaque tâche spécialisée requiert des compétences dans une et une seule discipline. Par ailleurs, deux tâches spécialisées différentes peuvent exiger des compétences dans une même discipline.

Nous considérons donc que les tâches sont définies et les compétences requises pour leur exécution sont identifiées. Les profils des opérateurs de maintenance qui seront chargés de leur exécution doivent alors être définis.

### 6.3.1.2 Processus de définition des profils des opérateurs

Pour définir les profils d'opérateurs de maintenance, le concepteur doit considérer non seulement l'ensemble des disciplines dont relèvent les tâches à exécuter, mais aussi les compétences et les qualifications facilement accessibles dans le futur lieu d'utilisation du système. L'ensemble des disciplines dont relève les tâches permet de déterminer les profils idéaux d'opérateurs. Mais, ces profils idéaux ne sont pas toujours disponibles dans le lieu d'exploitation du système. Il est donc très important de bien identifier les compétences disponibles localement dans le lieu d'exploitation du système. Car, pour des raisons économiques, l'équipe de maintenance sera constituée prioritairement des personnes locales qui disposent des compétences recherchées ou peuvent facilement les acquérir par le biais des formations. La figure 6.1 schématise le processus de définition des profils d'opérateurs de maintenance que nous venons de décrire.

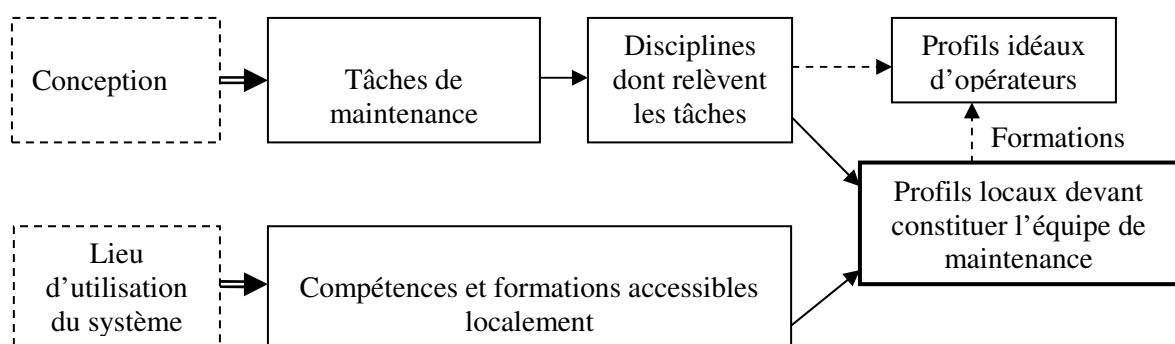


Figure 6.1 Processus de définition des profils d'opérateurs de maintenance

Pour identifier les compétences accessibles localement, plusieurs travaux sont disponibles dans la littérature (Pralhad *et al.*, 1990), (Spencer, 1993), (Meyer et Utterback, 1993), (Sanchez *et al.*, 1996). Les profils retenus, issus du lieu d'exploitation du système, peuvent donc être soit directement qualifiés à l'exécution des tâches, soit aptes à suivre des formations pour acquérir de nouvelles qualifications afin de tendre vers les profils idéaux. À titre d'exemple, pour l'exécution d'une tâche d'électronique dans un contexte où aucun électronicien n'est accessible, on peut prendre un profil proche comme un électricien et lui donner la formation complémentaire requise. Ainsi, pour une tâche du domaine de la mécanique, les profils candidats peuvent être par exemple : mécanicien, électromécanicien ou mécatronicien. Pour l'exécution d'une tâche d'électricité, les profils candidats peuvent être : électricien, électromécanicien ou électrotechnicien.

Rappelons qu'un profil peut être spécialisé (compétent dans une seule discipline) ou polyvalent (compétent dans plusieurs disciplines). Le profil électromécanicien par exemple, est considéré comme polyvalent car il peut être candidat à l'exécution des tâches de mécanique et celles d'électricité. Par contre, le profil mécanicien et le profil électricien sont spécialisés, car ils ne sont aptes à exécuter que les tâches du domaine de la mécanique et du domaine de l'électricité, respectivement. Par ailleurs, plusieurs profils peuvent être aptes à exécuter une même tâche spécialisée. Quant aux tâches non spécialisées, elles peuvent être exécutées par n'importe quel profil. On peut donc considérer que les tâches non spécialisées relèvent de toutes les disciplines identifiées. Une autre façon que nous adoptons pour la modélisation de ces tâches est de leur associer une discipline fictive et considérer que tous les profils ont des compétences dans cette discipline fictive.

La figure 6.2 illustre toutes ces considérations sur un ensemble de dix tâches à exécuter (1 à 10), relevant de cinq spécialités (a, b, c, d et e) avec un ensemble de quatre profils ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  et  $\eta$ ) candidats à leur exécution. Les tâches 1 à 9 sont spécialisées alors que la tâche 10 est une tâche non spécialisée. Pour sa modélisation, elle est rattachée à une spécialité fictive, f, qui est en correspondance avec tous les profils. Ce qui signifie que tous les profils sont qualifiés pour réaliser la tâche 10. Chaque tâche relève d'une et d'une seule discipline. Les tâches 3 et 8 sont de la même discipline, b. Les profils  $\alpha$ ,  $\gamma$  et  $\eta$  sont polyvalents car ils sont

reliés chacun à plus d'une discipline non fictive alors que le profil  $\beta$  est spécialisé car elle est reliée à une seule discipline non fictive, a. En définitive, la figure 6.2 permet de visualiser les liens entre l'ensemble des tâches, l'ensemble des spécialités et l'ensemble des profils candidats. Cette visualisation permet de déterminer quelle tâche peut être exécutée par quel profil et vice versa. Par exemple, la tâche 4 peut être exécutée par les profils  $\alpha$  et  $\beta$ . Le profil  $\eta$  peut réaliser les tâches spécialisées 3, 5, 7, 8 et 9, sans compter la tâche non spécialisée 10.

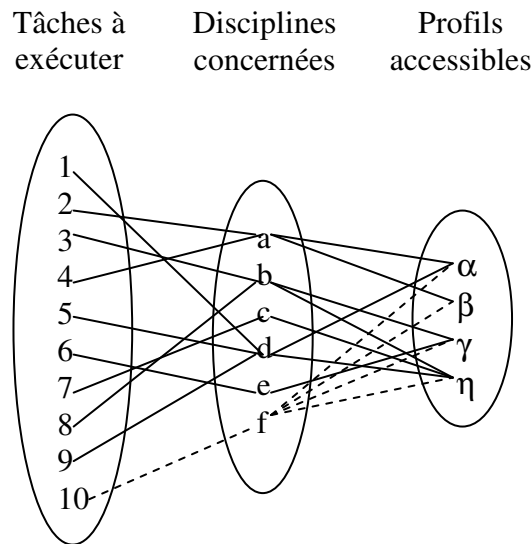


Figure 6.2 Modèle tâches-compétences-profils

Le nombre total de disciplines dont relève l'ensemble du portefeuille de tâches peut être considéré comme un indicateur de complexité du système. Si ce nombre est élevé, cela peut signifier que le système est assez complexe. Ce qui devrait inciter le concepteur à modifier le système pour diminuer sa complexité évaluée par le nombre de disciplines dont relève les tâches de maintenance. De même, si les compétences requises pour la maintenance du système ne sont pas accessibles dans son futur milieu d'utilisation, alors, le concepteur devrait modifier le système pour l'adapter aux compétences accessibles. Dans le cas où ces modifications ne sont pas possibles, le concepteur peut proposer, à l'utilisateur, des contrats de service pour la maintenance du système ou, si possible, de la e-maintenance.



## 6.3.2 Étape 2 : Détermination du nombre d'opérateurs par profil

### 6.3.2.1 Hypothèses

Une fois les profils définis, il faut déterminer le nombre d'opérateurs requis par profil. Ce nombre dépend de la durée totale des tâches à exécuter. On suppose que la durée d'exécution d'une tâche dépend du profil qui l'exécute. Dans ce cas, la durée d'exécution d'une tâche est en fait la moyenne de ses durées d'exécution par tous les profils candidats à son exécution. Chaque profil a, sur l'horizon considéré, un temps réglementaire de travail et un salaire fixe qui ne dépend pas de la durée des tâches exécutées. Il est aussi possible de confier la réalisation des tâches à des sous-traitants. On peut considérer plusieurs sous-traitants dans le processus de modélisation. Mais, pour cette application, nous considérons qu'il y a un seul sous-traitant et qu'il a les compétences requises pour exécuter n'importe quelle tâche du portefeuille. Le sous-traitant a aussi ses durées d'exécution par tâche. Mais, le coût d'exécution d'une tâche par le sous-traitant dépend de la tâche et de sa durée d'exécution. L'exécution de chaque tâche est donc confiée soit à l'équipe de maintenance soit au sous-traitant.

On cherche à déterminer le nombre d'opérateurs de chaque profil qui doivent constituer l'équipe de maintenance. On doit aussi déterminer si certaines tâches doivent être confiées au sous-traitant dans le but de minimiser le coût total d'exécution du portefeuille des tâches sur l'horizon considéré. Pour atteindre cet objectif, nous envisageons deux approches de modélisation présentées ci-dessous. Ces deux approches sont justifiées par le fait que les ensembles de tâches que peut exécuter chaque profil ne sont pas tous disjoints. En effet, à cause de la polyvalence, plusieurs profils peuvent être compétents pour exécuter une même tâche. La première approche procède par une affectation préalable des tâches aux profils, suivie du calcul du nombre d'opérateurs nécessaire par profil. La deuxième approche procède au calcul de l'effectif par profil sans passer par la phase d'affectation des tâches aux profils. Les deux approches sont modélisées par deux modèles de programmation linéaire mixte.

### 6.3.2.2 Approches de modélisation et de résolution

#### 6.3.2.2.1 Première approche : avec affectation préalable des tâches aux profils

À cause du fait que plusieurs profils et le sous-traitant peuvent exécuter une même tâche, la première approche procède en deux phases : la première phase consiste à affecter les tâches aux profils et au sous-traitant. Le but de cette manœuvre est de vider les intersections entre les ensembles de tâches que peut exécuter chaque profil. Cela permet, connaissant la durée totale d'exécution des tâches affectées à un profil donné, de calculer aisément le nombre d'opérateurs requis pour le profil considéré. Le sous-traitant peut être modélisé comme un profil spécial. La deuxième étape consiste à déterminer du nombre d'opérateurs requis par profil, en fonction de la durée totale des tâches affectées à chaque profil. En pratique, les deux étapes s'effectuent simultanément lors de la résolution du modèle mathématique qui découle de cette approche (le modèle 1 présenté dans la section suivante). La figure 6.3 illustre la phase d'affectation des tâches aux profils avec neuf tâches (1 à 9) et trois profils (A, B et C) candidats à leur exécution. La figure 6.3.a. présente les ensembles de tâches que peut exécuter chaque profil. Les intersections entre certains de ces ensembles ne sont pas vides. Par exemple les tâches 2 et 5 peuvent être exécutées par les profils A et C car, elles se trouvent à l'intersection des ensembles de tâches que peuvent exécuter les profils A et C. L'affectation des tâches aux profils consiste donc à vider toutes les intersections non vides de la figure 6.3.a. Donc chacune des tâches 2 et 5 doit être affectée soit au profil A soit au profil C. En vidant de cette manière toutes les autres intersections, on obtient la figure 6.3.b. Dans le cas spécifique de cet exemple, la figure 6.3.b. montre que, finalement, aucune tâche n'est affectée au profil A. Donc, aucun opérateur ayant ce profil ne sera requis. En somme, le modèle qu'on obtient de cette approche fournit, non seulement le nombre d'opérateurs par profil, mais aussi la liste des tâches que chaque profil sera appelé à exécuter sur l'horizon considéré.

Si l'horizon est trop long, cette approche aura comme avantage de procurer aux profils une parfaite maîtrise des activités qui leur seront affectées. Ce qui peut être considéré comme une pseudo-spécialisation des profils dans ces activités. Mais, cette approche présente aussi des inconvénients. En effet, si les tâches affectées aux profils ne sont pas variées, les profils

polyvalents risquent ne pas avoir l'occasion d'exploiter toutes leurs compétences. Par ailleurs, il y a des risques de tomber dans la routine. Ce qui peut constituer une source importante de démotivation des opérateurs.

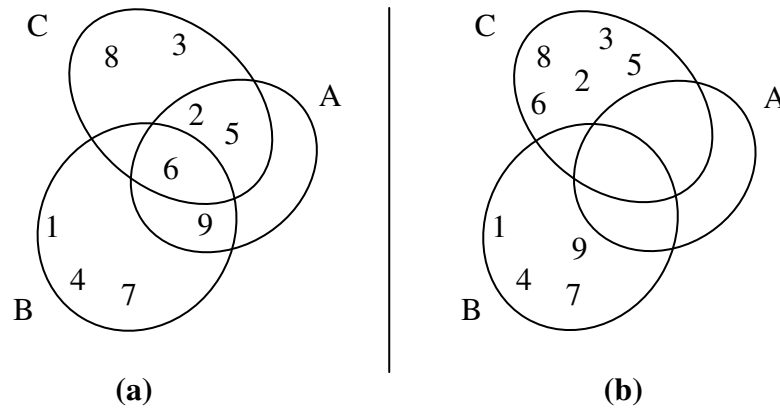


Figure 6.3 Affection des tâches aux profils

Les résultats fournis par le modèle issu de cette approche peuvent être utilisées comme données d'entrée du modèle d'allocation présenté dans (Ait-Kadi *et al.*, 2006). La deuxième phase de cette première approche est le calcul du nombre requis d'opérateurs par profil à l'aide du modèle mathématique n°1, présenté dans la sous-section 6.3.3.3.

#### 6.3.2.2.2 Deuxième approche : sans affectation préalable des tâches aux profils

Dans la deuxième approche, il n'y a pas d'affectation des tâches aux profils. Les ensembles des tâches que peut exécuter chaque profil restent donc dans leur état initial, avec des intersections non vides dans certains cas, comme l'illustre la figure 6.3a. Cet état initial reste inchangé durant tout le processus. Cette approche procède en une phase, en parcourant tous les sous-ensembles non vides de l'ensemble des profils. Le principe est le suivant : pour chaque sous-ensemble non vide (il y en a  $2^N - 1$ , si on a défini  $N$  profils), on identifie toutes les tâches dont, seuls, les profils appartenant au sous-ensemble considéré sont aptes à exécuter. Ces tâches sont dites exclusives à ces profils, car ils sont les seuls à pouvoir les exécuter. Par conséquent, le nombre total d'opérateurs de chacun de ces profils doit être, au

moins, suffisant pour exécuter toutes les tâches qui leur sont exclusives. A titre d'exemple, la figure 6.3a montre qu'on a  $n = 3$  profils (A, B et C). Par conséquent, l'ensemble des profils comporte donc  $2^3 - 1 = 7$  sous-ensembles non vides :  $\{A\}$ ,  $\{B\}$ ,  $\{C\}$ ,  $\{A, B\}$ ,  $\{A, C\}$ ,  $\{B, C\}$  et  $\{A, B, C\}$ . Si on considère le sous-ensemble formé uniquement par le profil C,  $\{C\}$ , les tâches qui lui sont exclusives sont les tâches 3 et 8. Le nombre d'opérateurs de profil C doit donc être, au minimum, suffisant pour exécuter les tâches 3 et 8. Si on considère le sous-ensemble  $\{A, C\}$  formé par les deux profils A et C, les tâches qui sont exclusives à ces deux profils réunis sont les tâches 2, 3, 5 et 8. Le nombre total d'opérateurs de profil A et de profil C doit être au minimum suffisant pour exécuter les tâches 2, 3, 5 et 8. On procède de la même manière jusqu'à couvrir tous les sous-ensembles non vides de l'ensemble des profils. Au final, on obtient le modèle 2, présenté à la sous-section 6.3.2.3. Contrairement à la première approche, pour cette deuxième approche, l'affectation des tâches aux opérateurs va se faire lors de la planification de leur exécution.

L'avantage de cette deuxième approche est que les profils ne sont pas confinés à certaines tâches. En effet, chaque profil et donc, chaque opérateur, conserve la possibilité de se voir attribuer n'importe quelle tâche pour laquelle il détient les compétences requises. Les opérateurs polyvalents ont donc la possibilité de valoriser toutes leurs compétences. Ce qui va procurer une grande flexibilité lors de l'affectation des tâches aux opérateurs pour leur exécution. Le modèle d'allocation de ressources proposé dans (El Assami *et al.*, 2007) peut être mis à contribution pour cette étape d'affectation des tâches aux opérateurs. Le principal inconvénient de cette approche est l'augmentation exponentielle du nombre  $2^N - 1$  de sous-ensembles de profils non vides à analyser lors que le nombre  $N$  de profils définis augmente. Cette augmentation pourrait nécessiter un temps de calcul important.

### 6.3.2.3 Modèles analytiques

La modélisation mathématique des deux approches présentées ci-dessus donne lieu à deux modèles de programmation linéaires mixtes, les modèles 1 et 2, présentés ci-dessous. Le modèle 1 découle de la première approche qui est celle avec affectation préalable des tâches aux profils. Le modèle 2 quant à lui est issu de la seconde approche qui procède sans affectation préalable des tâches aux profils. Les deux modèles permettent d'obtenir le

nombre adéquat d'opérateurs par profil, les tâches affectées au sous-traitant et le coût total d'exécution du portefeuille de tâches. La figure 6.4 présente les données d'entrée et de sortie des deux modèles.

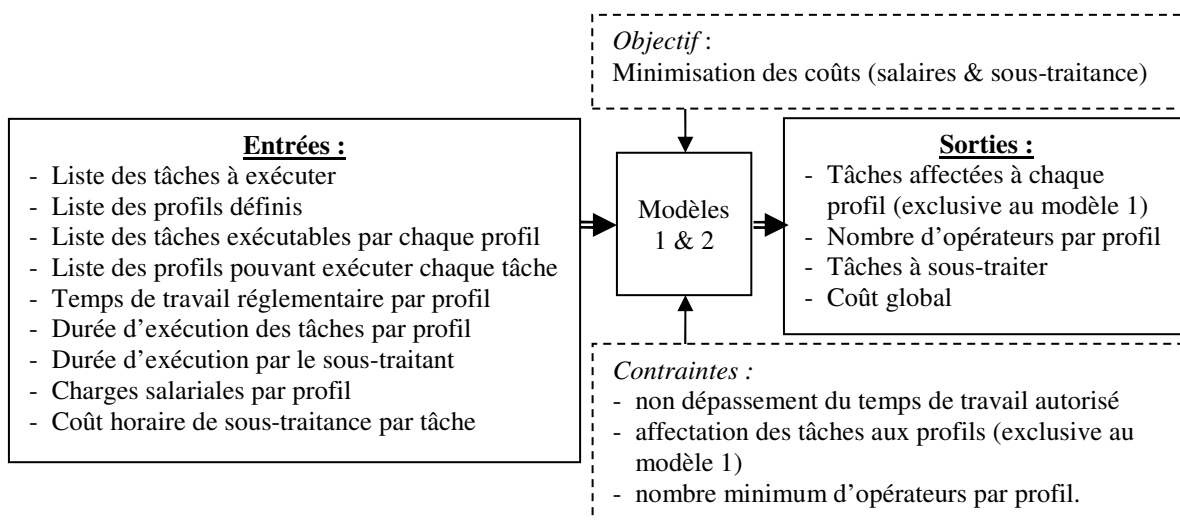


Figure 6.4 Contraintes et données d'entrée et de sortie des modèles

### ***Fonction objectif :***

Nous cherchons à déterminer le nombre d'opérateurs par profil et les tâches à sous-traiter afin de minimiser le coût total d'exécution des tâches. La fonction objectif est la même pour les deux modèles proposés. Elle représente le coût total d'exécution du portefeuille de tâches. Ce coût, que l'on cherche à minimiser, comporte deux composantes. D'une part, le coût des opérateurs, constitué des salaires et, éventuellement, d'autres frais comme les frais d'embauche et les frais de formation. Ces coûts sont fixes sur l'horizon considéré. D'autre part, le coût d'exécution des tâches par le sous-traitant. Cette composante ne prend évidemment en compte que les tâches à sous-traiter. C'est un coût variable, qui dépend de la tâche et de sa durée d'exécution par le sous-traitant.

### ***Variables de décision :***

$N_j$  : variable entière désignant le nombre requis d'opérateurs de profil  $j$ ;

$Y_{ij}$  : variable binaire qui vaut 1 si la tâche  $i$  est affectée au profil  $j$ , et vaut 0 sinon;

$Y_{i0}$  : variable binaire qui vaut 1 si la tâche  $i$  est affectée au sous-traitant et vaut 0 sinon;

**Paramètres :**

$M$  : le nombre total de tâches à exécuter;

$N$  : le nombre total de profils définis;

$T = \{t_i\}$  : l'ensemble des tâches  $i$  à exécuter ( $i=1, \dots, M$ );

$P = \{p_j\}$  : l'ensemble des profils  $j$  définis ( $j=1, \dots, N$ );

$T_j$  : l'ensemble des tâches que peut exécuter le profil  $j$ ;

$P_i$  : l'ensemble des profils pouvant exécuter la tâche  $i$ ;

$d_{ij}$  : la durée d'exécution de la tâche  $i$  par le profil  $j$ ;

$d_{i0}$  : la durée d'exécution de la tâche  $i$  par le sous-traitant;

$c_j$  : le salaire d'un opérateur ayant le profil  $j$  sur l'horizon considéré;

$c_{i0}$  : le coût horaire d'exécution de la tâche  $i$  par le sous-traitant;

$h_j$  : la durée de disponibilité d'un opérateur de profil  $j$  sur l'horizon considéré;

$n_0^j$  : le nombre minimum d'opérateur de profil  $j$  requis;

$\mathcal{P}^*(P)$  : l'ensemble des parties (sous-ensembles) non vides,  $X_\alpha$ , de  $P$  ( $\alpha=1, \dots, 2^N-1$ );

$T_{X_\alpha} = T - \left( \bigcup_{\substack{k \neq j \\ j \in X_\alpha}} T_k \right)$  : l'ensemble des tâches que seuls les profils  $j \in X_\alpha$  peuvent exécuter.

Les expressions (6.1), (6.4), (6.5) et (6.6) sont communes aux deux modèles. L'expression (6.1) représente la fonction objectif. Il s'agit de l'expression du coût total d'exécution du portefeuille des tâches. L'expression (6.4) exprime le fait qu'on puisse avoir besoin, pour une raison ou une autre, d'un minimum d'opérateurs d'un certain profil. Une des raisons possible de cette contrainte est le transfert de compétences entre deux générations d'opérateurs. Les familles de contraintes (6.5) et (6.6) indiquent respectivement les variables qui sont entières et les variables qui sont binaires.

Les contraintes (6.2) et (6.3) sont spécifiques au modèle 1. La contrainte (6.2) assure l'affectation des tâches aux profils et au sous-traitant. Cette contrainte se base sur le fait que chaque tâche doit être attribuée à un seul profil ou au sous-traitant. C'est donc elle qui permet de vider les intersections entre les ensembles de tâches que peut exécuter chaque profil. La famille de contraintes (6.3) permet de calculer le nombre d'opérateurs par profil, en fonction de la durée totale des tâches affectées au profil considéré, en respectant le temps réglementaire de travail du profil en question.

La famille de contraintes (6.7) est exclusive au modèle 2. Elle joue le même rôle que la contrainte (6.3) du modèle 1, mais de manières différentes. D'où la différence entre leurs expressions. L'expression (6.7) traduit le fait que le nombre total d'opérateurs des profils appartenant au sous-ensemble  $X_\alpha$  de  $P$  doit être suffisant pour réaliser toutes les tâches appartenant à l'ensemble  $T_{X_\alpha}$  des tâches exclusives à  $X_\alpha$ , c'est-à-dire, les tâches dont l'exécution ne peut se faire que par un ou plusieurs profils appartenant à  $X_\alpha$ . Dans le cas où plusieurs profils de  $X_\alpha$  peuvent exécuter une même tâche de  $T_{X_\alpha}$ , on considère comme durée de la tâche concernée, la moyenne des durées d'exécution de tous les profils pouvant l'exécuter. Le fait de parcourir systématiquement l'ensemble  $\mathcal{P}^*(P)$  des sous-ensembles non vides de  $P$  permet au programme de fixer un nombre adéquat d'opérateur par profil. Pour un ensemble de  $N$  profils définis, le nombre de sous-ensembles  $X_\alpha$  non vides qui doivent être examinés est égal à  $2^N - 1$ .

### 6.3.2.3.1 Modèle 1 : avec affectation préalable des tâches aux profils

Modèle issu de la première approche.

**Objectif :**

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^N c_j N_j + \sum_{i=1}^M c_{i0} d_{i0} Y_{i0} \quad (6.1)$$

**Sujet à :**

*Affectation des tâches aux profils*

$$Y_{i0} + \sum_{j \in P_i} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in T \quad (6.2)$$

*Non dépassement du temps réglementaire de travail par profil*

$$h_j N_j \geq \sum_{i \in T_j} d_{ij} Y_{ij} \quad \forall j \in P \quad (6.3)$$

*Minimum d'opérateurs par profil*

$$\sum_{j=1}^N N_j \geq n_0^j \quad \forall j \in P \quad (6.4)$$

*Intégralité et binarité des variables*

$$N_j \text{ entiers} \quad \forall j \in P \quad (6.5)$$

$$Y_{ij} \text{ et } Y_{i0} \text{ binaires} \quad \forall i \in T, \forall j \in P \quad (6.6)$$



### 6.3.2.3.2 Modèle 2 : sans affectation préalable des tâches aux profils

Modèle issu de la deuxième approche.

**Objectif :**

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^N c_j N_j + \sum_{i=1}^M c_{i0} d_{i0} Y_{i0} \quad (6.1)$$

**Sujet à :**

*Non dépassement du temps réglementaire de travail par profil*

$$\sum_{j \in X_\alpha} h_j N_j \geq \sum_{i \in T_{X_\alpha}} \left( \frac{\sum_{j \in X_\alpha} d_{ij}}{\text{card}(P_i)} \right) (1 - Y_{i0}) \quad (6.7)$$

$$\forall X_\alpha \in \mathcal{P}^*(P) / T_{X_\alpha} \neq \emptyset, \alpha = 1, \dots, 2^N - 1.$$

*Minimum d'opérateurs par profil*

$$\sum_{j=1}^N N_j \geq n_0^j \quad \forall j \in P \quad (6.4)$$

*Intégralité et binarité des variables*

$$N_j \text{ entiers} \quad \forall j \in P \quad (6.5)$$

$$Y_{ij} \text{ et } Y_{i0} \text{ binaires} \quad \forall i \in T, \forall j \in P \quad (6.6)$$

## 6.4 Illustration

Cet exemple a pour but d'illustrer la détermination du nombre d'opérateurs par profil et de valider la cohérence des modèles proposés (deuxième étape de notre méthodologie). Cet exemple n'illustre pas le processus de définition de ces profils (première étape de la méthodologie proposée). Nous prenons donc pour acquis que les profils ont déjà été définis.

On considère un ensemble de 10 tâches de maintenance à exécuter sur un système. Ces tâches ont été définies par le concepteur du système. Compte-tenu des disciplines donc relèvent ces tâches et des compétences disponibles localement dans le lieu d'exploitation du système, 4 profils d'opérateurs de maintenance ont été définis. Un sous-traitant est aussi capable d'exécuter chacune des 10 tâches. L'exécution des tâches doit se faire sur une journée. Toutes les tâches sont spécialisées, sauf la tâche  $t_7$  qui ne requiert aucune compétence technologique particulière. Le tableau 6.1 indique les profils ayant les compétences requises pour exécuter chaque tâche, ainsi que la durée d'exécution correspondante pour chaque profil. Par soucis de simplification, on suppose que la durée d'exécution d'une tâche donnée est la même pour tous les profils aptes à exécuter cette tâche. Le tableau 6.1 montre par exemple que la tâche  $t_2$  requiert une durée moyenne de 12 heures de travail et ne peut être exécutée que par le profil  $p_2$ . La tâche  $t_4$ , dont la durée moyenne est de 9 heures, ne peut être exécutée que par le profil  $p_3$  ou le profil  $p_4$ . La tâche  $t_7$ , non spécialisée, a une durée de 18 heures et peut être exécutée par n'importe quel profil. L'équipe de maintenance à constituer doit pouvoir exécuter toutes ces tâches en une journée de travail de 8h. Tous les profils n'ont pas le même temps de travail par jour et leur salaire n'est pas le même.

Tableau 6.1 Profils aptes à exécuter chaque tâche et la durée totale requise (en heures)

	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$
$p_1$	15				35	20	18	14		25
$p_2$	15	12	20			20	18			
$p_3$			20	9			18			25
$p_4$	15			9			18		16	25

Tableau 6.2 Données sur les profils

Profils, $p_j$	Salaire, $c_j$	Temps de travail, $h_j$	Nombre minimum d'opérateurs, $n_0^j$
p <sub>1</sub>	\$120	8 h	
p <sub>2</sub>	\$112	7 h	
p <sub>3</sub>	\$104	8 h	2
p <sub>4</sub>	\$120	6 h	1

Tableau 6.3 Durée et coût d'exécution par le sous-traitant

	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>	t <sub>7</sub>	t <sub>8</sub>	t <sub>9</sub>	t <sub>10</sub>
Durée d <sub>is</sub> (h)	15	12	20	9	35	20	18	14	16	25
Coût c <sub>is</sub> (\$)	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16

Le tableau 6.2 fournit, pour chaque profil, le temps de travail réglementaire, le salaire et le nombre minimum d'opérateurs requis. Il montre par exemple que le profil p<sub>4</sub> travaille 6h par jour et gagne un salaire journalier de 120\$. Par ailleurs, comme le profil p<sub>4</sub> est très expérimenté, il faut au moins un opérateur ayant ce profil pour encadrer les autres. De même, un minimum de 2 opérateurs ayant le profil p<sub>3</sub> est requis pour assurer la relève. L'exécution de chacune des 10 tâches peut être aussi confiée au sous-traitant. Le tableau 6.3 fournit, pour chaque tâche, la durée d'exécution par le sous-traitant et le coût horaire qui est le même quelle que soit la tâche.

Avec les données présentées par les tableaux 6.1, 6.2 et 6.3, le développement des expressions (6.1) à (6.6) est relativement facile. Mais le développement de la famille de contraintes (6.7) n'est pas très aisé. Le tableau 6.4 présente les informations permettant de faciliter la compréhension et le développement de cette famille de contraintes. Pour notre exemple, on a N = 4 profils, donc, on doit examiner  $2^4 - 1 = 15$  sous-ensembles  $X_\alpha$ , ( $X_1, X_2, \dots, X_{15}$ ). Le tableau 6.4 présente : le ou les profils appartenant à chaque sous-ensemble  $X_\alpha$  ; l'ensemble  $T_{X_\alpha}$  des tâches que, seuls, ces profils peuvent exécuter (tâches exclusives à  $X_\alpha$ )

et la durée totale de ces tâches. Par exemple, le premier sous-ensemble  $X_1$ , est formé uniquement par le profil  $p_1$ . Ce profil  $p_1$  est le seul ayant les compétences requises pour exécuter les tâches  $t_5$  et  $t_8$  dont la somme des durées est de 49 heures. Le sous-ensemble  $X_3$ , que compose seul le profil  $p_3$ , n'a aucune tâche exclusive ( $T_{X_3} = \emptyset$ ). Donc il n'y a pas de contrainte se rapportant à  $X_3$ . Comme tous les 14 autres  $T_{X_\alpha}$  ne sont pas vides, la famille des contraintes (6.7) se réduit à 14 contraintes et non 15. Le sous-ensemble  $X_{15}$  n'est autre que l'ensemble  $P$  lui-même.  $T_{X_{15}}$  est donc égal à  $T$ , l'ensemble des tâches à exécuter. La durée totale de toutes les tâches est de 184 heures.

Tableau 6.4 Tâches exclusives aux profils appartenant au sous-ensemble  $X_\alpha$ 

Partie $X_\alpha$	Profils $\in X_\alpha$	Tâches $\in T_{X_\alpha}$ (tâches exclusives aux profils $\in X_\alpha$ )										Durée totale (en heures)
$X_1$	$p_1$					$t_5$			$t_8$			49
$X_2$	$p_2$		$t_2$									12
$X_3$	$p_3$											0
$X_4$	$p_4$								$t_9$			16
$X_5$	$p_1, p_2$		$t_2$			$t_5$	$t_6$		$t_8$			81
$X_6$	$p_1, p_3$					$t_5$			$t_8$			49
$X_7$	$p_1, p_4$					$t_5$			$t_8$	$t_9$		65
$X_8$	$p_2, p_3$		$t_2$	$t_3$								32
$X_9$	$p_2, p_4$		$t_2$							$t_9$		28
$X_{10}$	$p_3, p_4$				$t_4$					$t_9$		25
$X_{11}$	$p_1, p_2, p_3$		$t_2$	$t_3$		$t_5$	$t_6$		$t_8$			101
$X_{12}$	$p_1, p_2, p_4$	$t_1$	$t_2$			$t_5$	$t_6$		$t_8$	$t_9$		112
$X_{13}$	$p_1, p_3, p_4$				$t_4$	$t_5$			$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	99
$X_{14}$	$p_2, p_3, p_4$		$t_2$	$t_3$	$t_4$					$t_9$		58
$X_{15}$	$p_1, p_2, p_3, p_4$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	184

Les deux modèles issus de cet exemple d'application ont été résolus par le logiciel d'optimisation LINGO6, développé par Lindo Systems Inc. (Lindo Systems, 1999), (Lindo Systems, 2000). Le tableau 6.5 présente les résultats obtenus. Ces résultats montrent que le nombre d'opérateurs, pour les 3 premiers profils, est le même pour les deux modèles : 8 opérateurs de profil  $p_1$ , aucun opérateur de profil  $p_2$  et 9 opérateurs de profil  $p_3$ . Par contre le nombre d'opérateurs de profil  $p_4$  diffère selon le modèle. Il est de 3 opérateurs avec le modèle 1 et de 1 opérateur avec le modèle 2. Cette différence est due au fait que, dans le modèle 1 le profil  $p_4$  hérite de la tâche  $t_9$  dont il est le seul apte à exécuter. Compte tenu du volume de cette tâche et le temps règlementaire de travail de  $p_4$ , il faut exactement 3 opérateurs de ce profil pour exécuter  $t_9$  dans la journée. Le modèle 2 suggère un seul opérateur de profil  $p_4$  juste pour respecter la contrainte qui impose au moins un opérateur de ce profil. Cet opérateur pourra exécuter d'autres tâches, mais pas la tâche 9 qui est confiée au sous-traitant. Si on supprime la contrainte qui impose au moins un opérateur de profil  $p_4$ , alors les deux modèles donnent des résultats strictement identiques comme l'indique le tableau 6.6. L'analyse du nombre d'opérateurs obtenu par profil au tableau 6.5 montre qu'à priori, les deux modèles privilégient les profils qui ont le temps de travail le plus long sur l'horizon considéré. C'est le cas des profils  $p_1$  et  $p_3$  qui s'en sortent avec le plus grand nombre d'opérateurs. Les tâches  $t_2$  et  $t_6$  sont affectées au sous-traitant par le modèle 1. Ce qui correspond à une durée de travail de 32 heures pour un coût de \$512. Le modèle 2, lui, affecte les tâches  $t_2$ ,  $t_8$  et  $t_9$  au sous-traitant. Soit un volume de 42 heures pour un coût de \$672. Concernant la spécificité du modèle 1, qui est l'affectation des tâches aux profils, il en résulte que les tâches  $t_1$ ,  $t_5$  et  $t_8$  sont affectées à  $p_1$ . Ce qui représente un volume de travail de 64 h. Comme on pouvait s'y attendre, aucune tâche n'est affectée à  $p_2$ , étant donné que le modèle suggère de ne pas avoir d'opérateurs de ce profil. Le profil  $p_3$  reçoit la charge des tâches  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_7$  et  $t_{10}$ , soit un volume de travail de 72 heures. Enfin, la tâche  $t_9$  revient à  $p_4$ .

Tableau 6.5 Synthèse des résultats des deux approches

Modèle	Nombre d'opérateurs				Tâches affectées aux profils et au sous-traitant					Coût total
	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	p <sub>3</sub>	p <sub>4</sub>	Sous-traitant	
Modèle 1	8	0	9	3	t <sub>1</sub> , t <sub>5</sub> et t <sub>8</sub>		t <sub>3</sub> , t <sub>4</sub> , t <sub>7</sub> et t <sub>10</sub>	t <sub>9</sub>	t <sub>2</sub> et t <sub>6</sub>	\$2768
Modèle 2	8	0	9	1					t <sub>2</sub> , t <sub>8</sub> et t <sub>9</sub>	\$2688

Tableau 6.6 Synthèse des résultats des deux approches (cas  $N_4^{\min} = 0$ )

Modèle	Nombre d'opérateurs				Tâches affectées aux profils et au sous-traitant					Coût total
	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	p <sub>3</sub>	p <sub>4</sub>	Sous-traitant	
Modèle 1	8	0	9	0	t <sub>1</sub> , t <sub>5</sub> et t <sub>8</sub>		t <sub>3</sub> , t <sub>4</sub> , t <sub>7</sub> et t <sub>10</sub>		t <sub>2</sub> , t <sub>6</sub> et t <sub>9</sub>	\$2664
Modèle 2	8	0	9	0					t <sub>2</sub> , t <sub>6</sub> et t <sub>9</sub>	\$2664

Ces résultats sont bien cohérents avec les contraintes des modèles. Le coût total obtenu par le modèle 1 est de \$2768. Il est plus élevé que celui de \$2688 obtenu par le modèle 2. Le modèle 2 semble plus intéressant que le modèle 1 dans ce cas simple, en plus de la flexibilité que offrent ses résultats lors de l'affectation des tâches aux opérateurs.

## 6.5 Conclusion

Ce chapitre présente une méthodologie permettant au concepteur de définir les compétences et le nombre d'opérateurs qui doivent exécuter les tâches de maintenance sur un système en cours de conception. Les résultats fournis font partie des recommandations à appliquer dans le contexte futur d'exploitation du système, afin de contribuer efficacement à l'atteinte du niveau de disponibilité exigé. La méthodologie proposée permet aussi au concepteur de mieux adapter le système qu'il conçoit à son futur contexte d'exploitation, en n'y intégrant que les composants dont la maintenance requiert les compétences disponibles dans le futur contexte d'exploitation. S'il est relativement difficile d'adapter le système à

son contexte d'utilisation, le concepteur peut aussi proposer des contrats de maintenance à l'utilisateur et pallier ainsi le manque éventuel de compétences locales pour l'exécution des tâches de maintenance. Deux approches de calcul du nombre d'opérateurs ont été proposées. La première approche est plus classique alors que la deuxième est innovante. La deuxième approche a l'avantage de préserver la flexibilité, due à la polyvalence de certains opérateurs, lors de l'affectation des tâches pour leur exécution. Ce qui n'est pas le cas avec la première approche qui confine les opérateurs, même polyvalents, à certaines tâches. Cependant, lorsque le nombre de profils définis est élevé, la deuxième approche présente une limite au niveau du nombre de sous-ensembles de profils à analyser. Un exemple simple a été utilisé pour valider la cohérence des modèles.

## Chapitre 7 Conclusion générale

La problématique de la validation des exigences de maintenabilité et de disponibilité en conception a été abordée dans cette thèse. Le but était de développer des outils permettant d'ouvrir la voie au développement d'un module de validation de la maintenabilité et de la disponibilité en conception. Les exigences de maintenabilité et de disponibilité apparaissent de plus en plus aux côtés des exigences classiques portant sur la structure et les fonctionnalités du produit. Cette apparition est due à la complexité croissante des nouveaux produits mis sur le marché. La validation des exigences fonctionnelles et structurelles est possible en conception grâce à des modules disponibles dans les systèmes CAO. Par contre, de tels modules ne sont pas disponibles pour la validation de la maintenabilité et de la disponibilité. Il faut donc les développer pour limiter les inconvénients causés par une unique validation a posteriori de la conception. Pour ce faire, un certain nombre de questions fondamentales se posent. Quels indicateurs peut-on utiliser? Comment peut-on procéder? Sachant que le contexte d'exploitation a une influence sur la maintenabilité et la disponibilité, comment peut-on le prendre en compte pour limiter cette influence? Les réponses proposées à ces questions ont été regroupées dans les chapitres 3, 4, 5 et 6.

Le chapitre 3 présente une analyse méthodique des principaux indicateurs de maintenabilité et de disponibilité présents dans la littérature. Le but était de déterminer ceux pouvant être évalués en conception. Ces indicateurs sont essentiellement utilisés en exploitation. La méthodologie adoptée a été la suivante. Dans un premier temps, les indicateurs ont été recensés. Dans un second temps, les paramètres permettant de les calculer ont été identifiés à partir de leurs expressions. En troisième lieu, les sources d'obtention des données permettant de calculer ces paramètres ont été identifiées. Parmi ces sources, celles pouvant être exploitées en conception ont été distinguées en quatrième lieu. Ce qui a permis de déduire finalement les indicateurs pouvant être évalués en conception. Parmi les indicateurs admissibles, la Moyenne des Temps Techniques de Réparation, MTTR, et la disponibilité stationnaire, UTR (Up Time Ratio), ont été choisis, respectivement, comme indicateurs de maintenabilité et de disponibilité à valider dans le cadre de cette thèse.



Au chapitre 4, une modélisation du processus générique de validation d'une caractéristique mesurée par indicateur quantitatif quelconque a été proposée. Ce processus comporte trois étapes : la collecte des données requises; l'évaluation de l'indicateur et, au cas où la solution ne satisfait l'exigence, l'analyse des résultats de l'évaluation pour déterminer les éléments qui pénalisent la solution et les corriger éventuelles. Ce modèle générique a été appliqué aux cas particuliers de validation de la maintenabilité et de la disponibilité, avec pour indicateurs respectifs le MTTR et le UTR. Un zoom a été effectué sur chacune des trois étapes du processus. Toutes les sous-étapes ont été décrites avec leurs données d'entrée, leurs données de sortie et les outils (modèles, méthodologie, etc.) à mettre en œuvre. Pour l'étape d'analyse des résultats de l'évaluation du MTTR, deux procédures ont été proposées afin d'identifier les composants qui pénalisent une solution. L'une d'elle s'applique dans le cas où une exigence est formulée, directement ou par déduction (allocation), sur chaque composant. L'autre est plus adaptée au cas de l'amélioration de maintenabilité dans une démarche volontaire du concepteur (aucune exigence spécifiée).

Pour certaines étapes, les outils à mettre en œuvre sont encore à développer. C'est dans ce sens qu'une méthodologie d'évaluation et d'optimisation du temps de démontage d'un composant a été proposée au chapitre 5. Cette méthodologie en cinq étapes permet au concepteur de sélectionner les types de liaisons à utiliser pour réaliser chaque connexion entre les composants. Elle lui permet aussi de sélectionner l'outillage à utiliser lors des opérations de démontage afin de minimiser le temps de démontage d'un composant. Elle peut être mise en œuvre en phase de conception détaillée lorsque toute la structure du système est définie, sauf les types de liaison qui vont réaliser les connexions entre les composants. La première des cinq étapes de la méthodologie est l'identification des connexions entre les composants. Cette identification est possible, par exemple, en convertissant le modèle CAO de la solution au format STEP. Elle peut aussi être effectuée visuellement pour des systèmes simples. La deuxième étape est la définition, par le concepteur, des types de liaisons possibles pour réaliser chaque connexion, ainsi que des contraintes auxquelles elles sont assujetties. La troisième étape est l'identification des sous-assemblages et des transitions réalisables lors des opérations de maintenance. Pour cette étape, un des modèles de désassemblage disponibles dans la littérature peut être utilisé. La

quatrième étape permet de générer toutes les séquences de transitions (ou séquences de démontage) pouvant être suivies pour le démontage de chaque composant. Pour ce faire une procédure permettant d'explorer la matrice de transition a été proposée. À la cinquième et dernière étape, on effectue la sélection optimale des types de liaison, de l'outillage et de la séquence de transition qui permettent de minimiser le temps de démontage des composants. Deux modèles mathématiques ont été proposés à cet effet. Les modèles peuvent prendre en compte des contraintes supplémentaires comme le budget de maintenance sur un horizon donné. Un exemple simple a été utilisé pour illustrer la mise en œuvre de la méthodologie et valider la cohérence des modèles. Pour la prise en compte du contexte d'exploitation du système afin de limiter les écarts souvent observés entre les caractéristiques annoncées et les caractéristiques réelles du système en exploitation, deux approches peuvent être envisagées par le concepteur. Soit adapter le système à son contexte d'exploitation, par exemple en n'intégrant au système que les technologies pouvant être maintenues sur place dans le contexte d'exploitation. Soit adapter le contexte au système, par exemple en définissant les recommandations à mettre en œuvre dans ce contexte.

Au chapitre 6, une méthodologie allant dans le sens de la deuxième approche a été proposée afin de permettre au concepteur de définir les recommandations en termes de nombre et de compétences des opérateurs qui devraient être chargés de la maintenance du système. Cette méthodologie comporte deux étapes. La première est la définition des profils de compétence des opérateurs. Pour définir ces profils, le concepteur se base sur les compétences requises par les tâches de maintenance et sur celles disponibles localement dans le contexte d'exploitation du système. Des formations sont envisagées pour éliminer les écarts éventuels. La deuxième étape est la détermination du nombre d'opérateurs requis par profil défini. Deux approches de modélisation ont été proposées. L'une, plus classique, passe par l'affectation préalable des tâches aux profils. Le nombre d'opérateurs par profil est alors déterminé en fonction de la charge totale de travail affectée au profil, en tenant compte du temps réglementaire de travail du profil sur l'horizon considéré. La deuxième approche, innovante, détermine le nombre d'opérateurs par profil sans affectation préalable des tâches. En cas de polyvalence de certains profils, cette deuxième approche offre de la flexibilité, plus tard, lors de l'affectation des tâches aux profils. Deux modèles

mathématiques sont issus de ces approches. Un exemple pédagogique a permis de valider la cohérence des résultats modèles.

Le travail effectué dans le cadre de cette thèse constitue une base pour le développement d'un module de validation de la maintenabilité et de la disponibilité en conception. Le processus générique proposé au chapitre 3 peut aussi être utilisé pour valider n'importe quelle autre caractéristique ou performance comportementale mesurée par un indicateur quantifiable. La méthodologie proposée au chapitre 6 peut aussi être mise en œuvre en exploitation avec les mêmes buts.

Des améliorations peuvent être apportées à certains niveaux. Par exemple, les modèles proposés au chapitre 5 pour l'évaluation et l'optimisation du temps de démontage des composants sont des modèles de programmation non linéaires avec des variables binaires. Leur résolution n'est pas facile pour des problèmes de grande taille. Il faut donc les adapter aux problèmes de grande taille en utilisant d'autres approches comme la programmation par contraintes. La deuxième approche d'estimation du nombre d'opérateurs de maintenance qui est proposée au chapitre 6 présente une limite au niveau du nombre de sous-ensembles de profils que doit analyser le modèle pour préserver la polyvalence des opérateurs. En effet, ce nombre peut croître de façon exponentielle si le nombre de profils définis devient élevé. Cela peut avoir un sérieux impact sur le temps de calcul, par exemple.

En somme, les contributions apportées par cette thèse sont les suivantes:

- Une méthode de validation de la maintenabilité et de la disponibilité en conception : un modèle générique du processus de validation. L'application de ce modèle à la validation du MTTR et du UTR d'une solution générée a été décrite ;
- Deux procédures d'identification des composants qui pénalisent une solution ;
- Une méthode d'optimisation du temps de désassemblage d'un composant ;
- Un algorithme permettant de générer les séquences de transitions (séquences de démontage) possibles de chaque composant à partir de la matrice de transition ;

- Un modèle de sélection des types de liaisons entre les composants pour minimiser le temps moyen de désassemblage des composants ;
- Un modèle de sélection des types de liaisons, de l'outillage et de la séquence optimale de désassemblage pour minimiser le temps de désassemblage sous une contrainte de budget ;
- Deux modèles d'estimation des ressources humaines pour la maintenance.

Les limites de ces contributions sont les suivantes:

- Les temps de fonctionnement et de réparations sont supposés suivre une distribution exponentielle ;
- Les interactions entre composants ne sont pas prises en compte (indépendance entre composants) ;
- La résolution des modèles mathématiques n'est pas facile pour les problèmes de grande taille ;
- L'illustration des modèles est faite avec des exemples pédagogiques ;
- Les durées de toutes les étapes de la phase active de maintenance (diagnostic, réparation, interchange, ...) ne sont pas prises en compte.

### ***Perspectives***

Les principales extensions envisagées sont les suivantes :

- La prise en compte d'autres lois de dégradation (Weibull, log-normale, ...)
- Le développement d'une méthodologie d'évaluation et d'optimisation des autres étapes du processus actifs de maintenance corrective, en particulier celle de diagnostic;

- La prise en compte de l'aspect dynamique (évolution) des compétences et de l'aspect stochastique de l'occurrence et des durées d'exécution des tâches de maintenance corrective ;
- La prise en compte du niveau de compétence des opérateurs dans l'estimation du temps de démontage
- La prise en compte de l'influence de la compétence des opérateurs et de l'environnement d'exécution des opérations des démontages;
- La prise en compte de l'impacte des activités de maintenance sur la fiabilité des composants;
- L'utilisation d'autres approches de modélisations (programmation par contrainte, ...);
- La validation des modèles mathématiques sur des cas industriels ;
- Le regroupement des composants en modules;
- Réalisation d'un démonstrateur d'évaluation de la maintenabilité pour intéresser les industriels au projet.
- L'intégration en CAO.

## Bibliographie

- Acuna S.T., Juristo N., (2004), «Assigning people to roles in software projects», *Software Practice and Experience*, N°34, pp. 675-696, 2004.
- AFNOR, (2005), *Management environnemental des produits: Eco-conception – Analyse du cycle de vie – Etiquetage environnemental – Certification écologique des produits*, Recueil Normes et Réglementation, AFNOR 2005, ISBN 2-12-213062-8.
- Ait-Kadi, D., (1993), «Availability Optimization for Randomly Failing equipments: Advances in Factory of the Future», *CIM and Robotics, Elsevier, Manufacturing Research and Technology*, 16, p. 333-942.
- Ait-Kadi, D., (2007), «Fiabilité des systèmes», Notes de cours, département de génie mécanique, Université Laval,
- Ait-Kadi, D., Diallo, C., Chelbi, A., (2004) «A Joint Spare-Provisioning and Preventive Maintenance Strategy for Availability Maximization », PSAM 7 / ESREL '04, 14 au 18 juin 2004, Berlin, Allemagne
- Ait-Kadi, D., Menye, J.-B., et Kane, H., (2006), «Ressource assignment model in maintenance activities scheduling», *International Journal of Production Research* (in press).
- Al-Hakim L., A. Kusiak and J. Mathew, (2000), «A graph-theoretic approach to conceptual design with functional perspectives». *Computer-Aided Design*, Volume 32, Issue 14, December 2000, pp 867-875
- ARMP-7, (2003), «Reliability and Maintainability (R&M) Part 7 : NATO R&M Terminology Applicable to ARMP's», Ministry of Defence, UK.
- Arsenault, J.E., and Roberts, J.A., (1980), *Reliability & maintainability of electronic systems, Digital system design series*, Computer Science Press, ISBN-10: 0914894242, 1980
- AutoDesk, (2005), *AutoCAD 2006 User's Guide*, Autodesk, Inc. (2005).
- Balachandran, M., Gero, J.S. (1990) *Role of prototypes in integrated expert systems and CAD systems* Gero, J.S, Ed, Berlin: Springer-Verlag, Applications of Artificial Intelligence in Engineering V, 1, pp. 195-211.
- Bernard, A., (2005) «Virtual engineering: methods and tools» Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers PART B - *Journal of Engineering Manufacture* Volume: 219 Issues: 5 Pages: 413-421 Published: May 2005
- Bernard, A. , Ammar-Khodja, S., Perry, N., Laroche, F., (2007) «Virtual engineering based on knowledge integration», *Virtual and Physical Prototyping* Volume 2, Issue 3, September 2007, Pages 137-154
- Blanchard, B. S. and Fabrycky, W. J., (2005), *Systems Engineering and Analysis*, 4th Edition, Prentice-Hall International Series in Industrial and Systems
- Boks, C.B., Kroll, E., Brouwers, W.C.J. and Stevels, A.L.N. (1996) «Disassembly modeling: two applications to a Philips 21" television set». *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Dallas, USA, 6-8 May.
- Bonjour E., (2008), «Contributions à l'instrumentation du métier d'architecte système : de l'architecture modulaire du produit à l'organisation du système de conception», Mémoire Habilitation à Diriger des Recherches, HDR, Université de Franche-Comté, nov. 2008.

- Boyd, J.A., Jr. (1992), «Allocation of reliability requirements: a new approach». Reliability and Maintainability Symposium, Las Vegas, NV, USA, 1992. Proceedings, Annual, 21-23 Jan
- Bronsvoort W. F. and A. Noort, (2004), «Multiple-view feature modelling for integral product development» *Computer-Aided Design*, Volume 36, Issue 10, 1 September 2004, pp 929-946
- Browning, T.R., (2001), «Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: A review and new directions» (2001) *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48 (3), pp. 292-306, doi: 10.1109/17.946528
- Brunetti G. and B. Golob, (2000), «A feature-based approach towards an integrated product model including conceptual design Information» *Computer-Aided Design*, Volume 32, Issue 14, December 2000, pp 877-887
- Chakrabarti, A., Bligh, T.P., (2001), «A scheme for functional reasoning in conceptual design» *Design Studies*, 22 (6), pp. 493-517. doi: 10.1016/S0142-694X(01)00008-4
- Chedmail, P., Maille, B. et Ramstein, E. «État de l'art sur l'accessibilité et l'étude de l'ergonomie en réalité virtuelle : Accessibility and ergonomics study with virtual reality, a state of the art», *Mécanique & Industries*, Vol.3, n°. 2, pp. 147-152, 2002.
- Chen S.J. (Gary), Lin L., (2004), «Modeling team member characteristics for the formation of a multifunctional team in Concurrent Engineering», *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 51, N°2, pp. 111-124, 2004.
- Chen, S.-F., Oliver, J.H., Chou, S.-Y. and Chen, L.-L., (1997) «Parallel disassembly by onion peeling», *Journal of Mechanical Design – Transactions of the ASME*, Vol. 119, No. 2, pp267-274, 1997
- Chipchak, J. S., (1970), «A practical Method of Maintainability allocation», *IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems*, Vol AES-7, No. 4, pp.585-589
- Clarkson, P.J. and Eckert, C.M. (2005) *Design process improvement - a review of current practice*, Springer Verlag, London, ISBN-10 : 185233701X.
- Corbo Pasquale, Michele Germani and Ferruccio Mandorli, (2004), «Aesthetic and functional analysis for product model validation in reverse engineering applications», *Computer-Aided Design*, Volume 36, Issue 1, January 2004, pp 65-74
- Coulibaly A., (2008), «Modélisation sémantique et évaluation de performances comportementales de produits en conception», Mémoire de HDR, Université Louis-Pasteur – Strasbourg I, 2008.
- Coulibaly, A., Houssin, R., Mutel, B., (2008) «Maintainability and safety indicators at design stage for mechanical products». *Computers In Industry*, Vol. 59, No. 5, pp. 438-449, 2008.
- Coulibaly, A., Mutel, B., et Ait-Kadi, D., (2007), «Product Modelling Framework for Behavioural Performance Evaluation at Design Stage». *Computers In Industry*, Vol. 58, No. 6, pp. 567-577.
- Coulibaly, A., Mutel, B., et Ait-Kadi, D., (2007b), «Manufactured Products Behavioral Performance Evaluation under environmental constraints», *Actes (CD-ROM) du 7<sup>ème</sup> Congrès International de Genie Industriel (CIGI 2007)*, Trois-Rivières, Canada, 5-8 juin.
- De Korvin A., Shipley F., Kleyle R., (2002), «Utilizing fuzzy compatibility of skill sets for team selection in multi-phase projects», *Journal of Engineering Technology Management*, Vol. 19, pp 307-319, 2002.

- Deng, Y.-M., (2002), «Function and behavior representation in conceptual mechanical design» (2002) *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 16 (5), pp. 343-362.
- Deng, Y.-M., Britton, G.A., Tor, S.B., (2000), «Constraint-based functional design verification for conceptual design» *Computer-Aided Design*, 32 (14), pp. 889-899., doi: 10.1016/S0010-4485(00)00077-4
- Dhillon B. S. (1999), *Engineering Maintainability : How to Design for Reliability and Easy Maintenance*, Gulf Publishing Compagny, 1999.
- Dhillon B.S. (1998). *Advanced design concepts for engineers*. Technomic Pub Co., Lancaster, PA, c1998. ISBN: 1566766265
- Dhillon B.S., (2002), *Engineering Maintenance : A Modern Approach*, CRC Press, ISBN 1-58716-142-7, 2002.
- Dieter, G.E., *Engineering Design: A Materials and Processing Approach*, 3rd ed., McGraw-Hill, Singapore, 2000
- Dilworth, J. B., (1993), *Production and operations management : manufacturing and services*, 5<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, New York.
- DOD, (2005), «DOD Guide For Achieving Reliability, Availability and Maintainability: Systems Engineering for Mission Success», US Department of Defense, August 2005.
- Dorst, K., Vermaas, P.E., (2005), «John Gero's function-behaviour-structure model of designing: A critical analysis» *Research in Engineering Design*, 16 (1-2), pp. 17-26., doi: 10.1007/s00163-005-0058-z
- Ebeling C. E., (1997), *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, McGraw-Hill, 1997.
- El Assami, Y., Aït-Kadi, D., Menye, J.-B. et Kane, H., (2007), «Modèle d'allocation d'opérateurs polyvalents dans l'ordonnancement de tâches de maintenance», *Actes (CD-ROM) du 7<sup>ème</sup> Congrès International de Genie Industriel (CIGI 2007)*, Trois-Rivières, Canada, 5-8 juin.
- Eynard Benoît, Thomas Gallet, Pierre Nowak and Lionel Roucoules, (2004), «UML based specifications of PDM product structure and workflow» *Computers in Industry*, Volume 55, Issue 3, December 2004, pp 301-316
- Eynard, Benoît Sébastien Liénard, Sébastien Charles, Aurélien Odinot, (2005), «Web-based Collaborative Engineering Support System: Applications in Mechanical Design and Structural Analysis». *Concurrent Engineering*, Vol. 13, No. 2, 145-153 (2005) DOI: 10.1177/1063293X05053799
- Fitzpatrick E., Askin R., (2005), «Forming effective worker teams with multi-functional skill requirements», *International Journal of Computers and Industrial Engineering*, Vol. 48, pp.593–608, 2005.
- Friedenthal S., Moore A., Steiner R., (2008), «OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™): Tutorial», *18<sup>th</sup> Annual International Symposium INCOSE 2008: Systems Engineering for the Planet*, The Netherlands, 2008, 15-19 June.
- GDR MACS (2007), «Rapport Comité d'Experts Productique», Prospective de Recherche, 15 Janvier 2007.
- Gero, J.S., Kannengiesser, U., (2004), «The situated function-behaviour-structure framework», *Design Studies*, 25 (4), pp. 373-391. doi: 10.1016/j.destud.2003.10.010



- Gero, J.S., Kannengiesser, U., (2006), «A function-behaviour-structure ontology of processes», *Design Computing and Cognition'06*, pp. 407-422. J. S. Gero (ed), Springer
- Giudice, F., La Rosa, G., Risitano, A., (2006), *Product Design for the Environment :A Life Cycle Approach*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, ISBN: 0-8493-2722-9
- Groneau N., Fröming J., Schmid S., Rüssbüldt U., (2007), «Approach for requirement oriented team building in industrial processes», *Computers in Industry*, Vol. 58, N°2, pp. 179-187, 2007.
- Hadj-Hamou K., Caillaud E., (2004), «Cooperative Design: a Framework for Competency Based Approach», *5th Int. Conf. On Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, IDMMÉ'04, Université de Bath, 5-7 avril 2004.
- Hepperle, C., Maier, A.M., Kreimeyer, M., Lindemann, U. and Clarkson, P.J., (2007), «Analyzing communication dependencies in product development using the design structure matrix» in 9th International Design Structure Matrix Conference (DSM'07), Munich, Germany.
- Hicks, B. J. and S. J. Culley, (2002), «An integrated modelling environment for the embodiment of mechanical systems» *Computer-Aided Design*, Volume 34, Issue 6, May 2002, pp 435-451
- Huang G. Q. and K. L. Mak, (1999), «Design for manufacture and assembly on the Internet», *Computers in Industry*, Volume 38, Issue 1, January 1999, pp 17-30
- IEC 60050-191, (1990), «International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 191 : Dependability and quality of service», International Standard, International Electrotechnical Commission, IEC, December 1990
- IEC 60300-3-3 (2004) «Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life cycle costing» International Standard, International Electrotechnical Commission (IEC)
- IEC 60300-3-4, (2007), «Dependability management – Part 3-4: Application guide – Guide to the specification of dependability requirements», International Standard, International Electrotechnical Commission, IEC, Geneva, 2007.
- IEC 60706-2, (2006), «Maintainability of equipment – Part 2: Maintainability requirements and studies during the design and development phase», 2<sup>nd</sup> Edition, International Standard, International Electrotechnical Commission, IEC, Geneva, 2006.
- IEC 60812, (2006) «Analysis techniques for system reliability - Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)», International Standard, International Electrotechnical Commission, IEC, Geneva, 2006
- IEC 61025 (2006) “Fault tree analysis (FTA)”, International Standard, International Electrotechnical Commission, IEC, Geneva, 2006
- IEC 61078 (2006) «Analysis techniques for dependability – Reliability block diagram and boolean methods», International Standard, International Electrotechnical Commission, IEC, Geneva, 2006
- IEC 61703 (2001), «Mathematical Expressions for Reliability, Availability, Maintainability and Maintenance Support Terms» International Standard, International Electrotechnical Commission, IEC, Geneva,
- IEC 62347 (2006), «Guidance on system dependability specifications», International Standard, International Electrotechnical Commission, IEC, Geneva,

- Ireson W., Coombs C.F., Moss R.Y., (1995), *Handbook of Reliability Engineering and Management*, 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill Companies, ISBN 0-07-012750-6, 1995.
- ISO 10303-1:1994, (1994), «Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 1: Overview and Fundamental Principles», International Standard, ISO TC184/SC4, 1994.
- ISO 9000:2000, (2000) «Quality management systems – Fundamentals and vocabulary», International Standard, International Standard Organization (ISO), Geneva, 2000.
- ISO/TS 16949:2002 (2002) «Quality management systems – Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organizations» International Standard, International Standard Organization (ISO), Geneva
- Jaluria Y., (2008), *Design and Optimization of Thermal Systems*. 2nd Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, ISBN-13: 978-0-8493-3753-6
- Javel, G., (2003), *Pratique de la gestion industrielle : organisation, méthodes et outils*, Dunod : Éditions de l'Usine nouvelle, Paris.
- Kahn Hilary, Nick Filer, Alan Williams and Nigel Whitaker, (2001), «A generic framework for transforming EXPRESS information models», *Computer-Aided Design*, Volume 33, Issue 7, June 2001, pp 501-510
- Kalligeros K., de Weck O., de Neufville R., Luckins A., (2006), «Platform Identification using Design Structure Matrices», Sixteenth Annual International Symposium of the International Council On Systems Engineering (INCOSE), Orlando, Florida, 8 - 14 July 2006
- Kececioglu, D., (1991) *Reliability Engineering Handbook*, Vol 2, PTR Prentice Hall, 1991
- Kendall, K. E. Kendall, J. E. (2005) *Systems analysis and design*. 6th Edition. Upper Saddle River, NJ : Pearson/Prentice Hall, c2005. ISBN: 0131454552.
- Ke-Zhang Chen and Xin-An Feng, (2004), «CAD modeling for the components made of multi heterogeneous materials and smart materials». *Computer-Aided Design*, Volume 36, Issue 1, January 2004, pp 51-63
- Kikuo Fujita, (2002), «Product variety optimization under modular architecture», *Computer-Aided Design*, Volume 34, Issue 12, October 2002, pp 953-965
- Kumar V., D. Burns, D. Dutta and C. Hoffmann, (1999), « A framework for object modeling», *Computer-Aided Design*, Volume 31, Issue 9, August 1999, pp 541-556
- Kutz, M. (2006) *Mechanical engineers' handbook*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, N.J., c2006, ISBN: 0471449903
- Labrousse, M., A. Bernard, (2003), «Modèle FBS enrichi pour la modélisation des processus d'entreprise», Proceedings of CPI Conference 2003, Morocco.
- Labrousse, M; Bernard, A; Veron, P., (2004), «Generic FBS concept for process/product/resource integration», 5th Int. Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, APR 13-17, 2004, Lausanne, Switzerland. Tools and Methods of Competitive Engineering Vol. 1, 2004
- Lambert A. J. D., (2002), «Determining optimum disassembly sequences in electronic equipment», *Computers & Industrial Engineering*, vol. 43, n° 3, 2002, p. 553-575.
- Lambert A. J. D., (2003), «Disassembly sequencing: a survey», *International Journal of Production Research*, vol. 41 n° 16, 2003, p. 3721-3759.
- Lamit, G., (2008), *Pro/ENGINEER Wildfire™ 4.0*, 1st ed., CL-Engineering, 2008, ISBN: 0495411191

- Lewis, E.-E. (1994). *Introduction to Reliability Engineering*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Li, J.R., Khoo, L.P., Tor, S.B., (2005), «An object-oriented intelligent disassembly sequence planner for maintenance». *Computers in Industry* Vol. 56, No.7, pp. 699–718, 2005
- Lindo Systems, (1999), *Lingo: the modeling language and optimizer – User’s guide*, LINDO Systems Inc., Chicago, 1999.
- Lindo Systems, (2000), *Optimization modeling with Lingo*, LINDO Systems Inc., Chicago, 2000.
- Ma Weiyin, Yongmin Zhong, Shiu-Kit Tso and Tianxiang Zhou, (2004), «A hierarchically structured and constraint-based data model for intuitive and precise solid modeling in a virtual reality environment» *Computer-Aided Design*, Volume 36, Issue 10, 1 September 2004, pp 903-928
- Maffin, D., «Engineering design models: Context, theory and practice», *Journal of Engineering Design*, 9(4), 315–327, 1998.
- Menye J.-B., Ait-Kadi D., Coulibaly A., Caillaud E., Zwingmann X., «Contribution à l’optimisation du MTTR d’un système mécanique en conception», 8ème Congrès International de Génie Industriel CIGI 2009, Tarbes, 10-12 juin 2009.
- Menye, J.-B., Ait-Kadi, D., Coulibaly, A., Caillaud, E., (2007), «Prise en compte de la maintenabilité en conception des produits mécaniques», *Actes (CD-ROM) du 7ème Congrès International de Génie Industriel (CIGI 2007)*, Trois-Rivières, Canada, 5-8 juin, 2007.
- Meyer M., Utterback J., (1993), «The Product Family and the Dynamics of Core Capability», *Sloan Management Review*, Vol. 34, N°3, pp. 29-47, Spring 1993.
- Military Handbook – 1472F, (1999), « Design Criteria Standard: Human Engineering», US Department of Defense.
- Military Handbook – 217F, (1991), «Reliability Prediction of Electronic Equipment- Notice F», US Department of Defense
- Military Handbook – 310, (1997), «Global Climatic Data for Developing Military Products», US Department of Defense
- Military Handbook – 338B, (1998), «Electronic Reliability Design Handbook», US Department of Defense
- Military HandBook – 470A, (1997), «Designing and Developing Maintainable products and Systems», U.S. Department of Defense, Washington, DC. 1997.
- Military Handbook – 502, (1997), «Acquisition Logistics», US Department of Defense.
- Military HandBook – 791, (1988), «Maintainability design techniques», U.S. Department of Defense, Washington, DC, 1988.
- Military Standard – 1629A, (1980), «Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis». U.S. Department of Defence, Washington, DC, 1980.
- Military Standard – 810F, (2000), «Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests», US Department of Defense.
- Military Standard-721C, (1981), «Definitions of Terms for Reliability and Maintainability», Military Standard, US Department Of Defense, Washington, DC.
- Mutel , B., Coulibaly, A., (1995), «Design for Manufacturing by Analogy: The likeness and the differences between Group Technology and Features Approaches». Proc. 11th ISPE/IEE/IFAC International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of

- Future (CARS & FOFS'95). pp 622-627, 28-30 August 1995, Pereira, Colombia, South America.
- Nachlas, J.-A. (2005). *Reliability Engineering: probabilistic models and maintenance methods*. Taylor & Francis, New York, ISBN-10: 0849335981
- NASA/TM-2006-214535 (2006), «Design, Development, Testing and Evaluation-Human Factors Engineering, Report», NASA Engineering and Safety Center's, US
- NASA-STD-3000 (1994), «Man-Systems Integration Standards - Vol.3», NASA, US.
- NASA-STD-3000 (1995), «Man-Systems Integration Standards - Vol.1», NASA, US.
- NASA-STD-5017 (2006), «Design and Development Requirements for Mechanisms», NASA Technical Standard, US
- NF L 00-007 B «Industrie aéronautique et spatiale - Vocabulaire : termes généraux»
- NF X60-301 (1982), «Guide pour la prise en compte des critères de maintenabilité des biens durables à usage industriel et professionnel - Fascicule de documentation» (versions française et anglaise), Norme française, Mai 1982.
- Nikolaos, L., (2005), *Arbres de défaillances*. 2<sup>ème</sup> éd., Hermes-Lavoisier, Paris, ISBN : 2-7462-1067-3, 2005
- NSWC-07 (2007) «Handbook of Reliability Prediction Procedures For Mechanical Equipment» Naval Surface Warfare Center, US
- O'Connor, P. D. T., (2002), *Practical Reliability Engineering*, 4th Edition, John Wiley, 2002, ISBN-10: 0470844639
- Ostrosi, E., Coulibaly A., Mutel B., (1995), «Features Recognition in Knowledge-based analysis of Manufacturing Parts». Proc, IAR Workshop on Knowledge Engineering and Object Oriented Automation. Strasbourg, France, 1995.
- Pahl G., Beitz W., Feldhusen J. and Grote K.-H. (2007), *Engineering Design: A systematic approach*, 3rd Edition, Springer, 2007, ISBN-10: 1846283183
- Pomares J., S. T. Puente, F. Torres, F. A. Candelas and P. Gil, (2004), «Virtual disassembly of products based on geometric models», *Computers in Industry*, Volume 55, Issue 1, September 2004, pp 1-14
- Pomares, J., Puente, S.T., Torres, F., Candelas, F.A., Gil P., (2004) «Virtual disassembly of products based on geometric models». *Computers in Industry* Vol. 55, No. 1, pp. 1–14, 2004.
- Pouliquen, M; Bernard, A; Marsot, J; Chodorge, L, (2007), «Virtual hands and virtual reality multimodal platform to design safer industrial systems», *Computers In Industry* 58 (1):46-56 Art No. 10.1016/j.compind.2006.04.001/ISSN 0166-3615 2007
- Prahalad C.K., Hamel G., (1990), «The core competence of the corporation», *Harvard Business review*, pp 79-91, may-june 1990.
- Rajpa P.S. I, K.S. Shishodia and G.S. Sekhon, (2006), «An artificial neural network for modeling reliability, availability and maintainability of a repairable», *system. Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 91, Issue 7, July 2006, Pages 809-819
- Ramakumar, R., Dhillon, B., Jambekar, A., and Pelc, K., (2000), «Reliability and Maintainability», *Technology Management Handbook*, Ed. Richard C. Dorf, Boca Raton: CRC Press LLC.
- RG Aéro 000 14 A (1993) «Définition d'un produit – Guide pour l'élaboration du Dossier de Définition»

- RG Aéro 000-40, (1991), «Recommandations générales pour la spécification de management de programme».
- Roy U., N. Pramanik, R. Sudarsan, R. D. Sriram and K. W. Lyons, (2001), «Function-to-form mapping: model, representation and applications in design synthesis», *Computer-Aided Design*, Volume 33, Issue 10, September 2001, pp 699-719
- Salomone T. A., (1995), *What every engineer should know about Concurrent Engineering*, New York, Ed. Marcel Dekker, 1995.
- Salvendy, G., (2001), *Handbook of industrial engineering :technology and operations management*, 3<sup>rd</sup> Edition, Wiley, New York.
- Sanchez R., Mahomey J.T., (1996), «Modularity, flexibility and knowledge management in product and organization design», *Strategic Management Journal*, Vol. 17, pp. 63-76, 1996.
- Sellgren U., Drogou R., A., (1998), *System and Process Approach to Behaviour Modeling in Mechanical Engineering*, Royal Institute of Technology - KTH, Stokholm, 1998.
- Siddiqi A., de Weck O., (2006), «Spare Parts Requirements for Space Missions with Reconfigurability and Commonality», *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2006
- Smith, D., J., (2005), *Reliability, Maintainability and Risk : practical methods for engineers*, 7<sup>th</sup> Ed., Amsterdam, Elsevier/Butterworth-Heinemann, ISBN:0750666943, 2005
- Spencer L.M., Spencer S.M., (1993), «Definition of competency», Chap. 2 In "*Competence at Work, Models for Superior Performance*", John Wiley and Sons inc, pp 9-16, 1993.
- Stapelberg, R.F., (2009) *Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design*. Springer, London, 2009, 827p. ISBN:1848001754
- Stevenson W.J. et Benedetti C., (2006), *La gestion des opérations, produits et services*, 2<sup>ème</sup> Edition, Chenelière/McGraw-Hill, Montréal.
- Subba Rao V. M., Milind D., Jayant R., (1999), « Optimal Reliability allocation with discrete Cost-Reliability Data for components » *Operation Research* Vol. 47 , Issue 6 (June 1999) Pages: 899 - 906
- Tanaka Fumiki and Takeshi Kishinami, (2006), «STEP-based quality diagnosis of shape data of product models for collaborative e-engineering», *Computers in Industry*, Volume 57, Issue 3, April 2006, pp 245-260
- Thimm G., S.G. Lee and Y.-S. Ma, (2006), «Towards Unified Modelling of product life-cycles», *Computers in Industry*, Volume 57, Issue 4, May 2006, pp 331-341
- Tickoo S., (2008), *CATIA V5R18 for Designers*, CADCIM Technologies, 2008, ISBN : 1932709576
- Tsai H-T., Moskowitz H., Lee L-H., (2003), «Human resource selection for software development projects using Taguchi's parameter design», *European Journal of Operational Research*, Vol. 151, pp 167-180, 2003.
- Ullman, D.G., *The Mechanical Design Process*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2003
- Ulrich, K.T. and Eppinger, S.D., *Product Design and Development*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 2000.
- Wentzell, T. H. (2004), *Machine design*. Clifton Park, NY : Thomson Delmar Learning, 2004 ISBN : 1401805175

- Xue D. and H. Yang, (2004), «A concurrent engineering-oriented design database representation model», *Computer-Aided Design*, Volume 36, Issue 10, 1 September 2004, Pages 947-965
- Zaytoon Janan, Pierre Ladet, (2009), «Rapport Projet GDR MACS 2006-2009»
- Zha Xuan F. and H. Du, (2006), «Knowledge-intensive collaborative design modeling and support: Part I: Review, distributed models and framework», *Computers in Industry*, Volume 57, Issue 1, January 2006, pp 39-55
- Zwingmann, X., (2005), «Modèle d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception», Thèse de doctorat, Université Laval, 2005.
- Zwingmann, X., Ait-Kadi, D., Coulibaly, A., et Mutel, B., (2008), «Optimal disassembly sequencing strategy using constraint programming approach», *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 14 No. 1, pp46-58, 2008.