



**HAL**  
open science

## Mise en œuvre d'une méthodologie d'évaluation de la fiabilité pour les systèmes mécatroniques

Naima Hammouda, Georges Habchi, Christine Barthod, Olivier Duverger

### ► To cite this version:

Naima Hammouda, Georges Habchi, Christine Barthod, Olivier Duverger. Mise en œuvre d'une méthodologie d'évaluation de la fiabilité pour les systèmes mécatroniques. 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. pp.1-6. hal-00873677

**HAL Id: hal-00873677**

**<https://univ-smb.hal.science/hal-00873677v1>**

Submitted on 16 Oct 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Mise en œuvre d'une méthodologie d'évaluation de la fiabilité pour les systèmes mécatroniques

N. HAMMOUDA<sup>a</sup>, G. HABCHI<sup>a</sup>, C. BARTHOD<sup>a</sup>, O. DUVERGER<sup>b</sup>

a. Laboratoire SYMME, Université de Savoie - 74944 Annecy le Vieux Cedex France

b. Pole Mécatronique, Transmissions et Capteur, CETIM - 74944 Annecy le Vieux Cedex France

## Résumé :

*La fiabilité est l'un des paramètres les plus importants de la sûreté de fonctionnement. Elle est abordée à chaque fois que l'on veut des systèmes fiables, disponibles et sûrs. En effet, la fiabilité agit sur la disponibilité et sur la sûreté des systèmes. Elle intervient tout au long du cycle de vie du produit ou du système (conception, fabrication, exploitation).*

*L'objectif de cette communication est la mise en œuvre d'une approche globale d'étude de fiabilité dédiée aux systèmes mécatroniques. Ces derniers sont des systèmes pluri-technologies et complexes intégrant plusieurs aspects : dynamique, hybride, reconfigurable et interactif.*

## Abstract:

*Reliability is one of the most important parameters of dependability. It is addressed whenever we want reliable, available and safe systems. Indeed, reliability acts on the availability and security of systems. It must be considered throughout the overall life cycle of the product or system (design, manufacturing, operation).*

*The objective of this communication is to build an overall approach of reliability for mechatronic systems since they are complex and multi-technology integrating several properties such as: dynamic, hybrid, reconfigurable, and interactive.*

**Mots clefs :** Méthodologie globale, fiabilité, système mécatronique, cycle en V, modélisation, simulation, analyses qualitative et quantitative.

## 1 Introduction

L'apparition des systèmes mécatroniques depuis une vingtaine d'années peut être considérée comme une révolution pour le monde industriel. L'utilisation de ces systèmes s'est généralisée rapidement et influence actuellement la quasi-totalité des secteurs de l'industrie.

Avant d'aborder « la fiabilité » qui est le thème central de cette communication, essayons de faire un tour d'horizons afin de cerner ce que la bibliographie entend par le terme « Mécatronique ». En effet, plusieurs définitions existent. Citons de manière non exhaustive les principales ; la définition du journal international *Mechatronics*, parue pour la première fois en 1991 : “*Mechatronics in its fundamental form can be regarded as the fusion of mechanical and electrical disciplines in modern engineering process. It is a relatively new concept to the design of systems, devices and products aimed at achieving an optimal balance between basic mechanical structures and its overall control*” [14] ; celle du journal international *IEEE Transactions on Mechatronics*, apparue en 1996 : “*Mechatronics is the synergetic combination of mechanical engineering with electronics and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes*” [13].; ou bien encore, celle choisie par l'IFAC Technical Committee on Mechatronic Systems, en 2000 : “*Many technical processes and products in the area of mechanical and electrical engineering show an increasing integration of mechanics with electronics and information processing. This integration is between the components (hardware) and the information-driven function (software), resulting in integrated systems called mechatronic systems*” [15].

D'après la norme NF E-010, la mécatronique est définie comme une « démarche visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité » [12].

En termes de propriétés, la bibliographie souligne que les systèmes mécatroniques sont des systèmes complexes et pluri-technologies caractérisés par des aspects *hybrides, dynamiques, interactifs* et *reconfigurables*. Les systèmes hybrides sont des systèmes faisant intervenir explicitement et simultanément des phénomènes continus et d'évènements discrets [6]. Les systèmes dynamiques sont caractérisés par les relations fonctionnelles entre les composants qui les constituent. Si ces relations restent figées tout au long de la mission du système, le système sera dit statique. Si au contraire, ces relations changent au cours de la mission, le système sera dit dynamique [5]. Le caractère interactif d'un système est défini par l'existence d'interactions physiques et/ou fonctionnelles entre les composants du système. Enfin, les systèmes reconfigurables sont des systèmes capables de modifier leurs structures internes afin d'assurer la réalisation de la fonction [5]. Tous ces caractères doivent être pris en compte lors du développement de la méthodologie afin d'assurer la fiabilité de ces systèmes.

L'un des problèmes majeurs rencontrés lors de la phase de conception des systèmes mécatroniques concerne l'évaluation de la fiabilité mais aussi l'approche selon laquelle cette fiabilité sera étudiée pour être évaluée. En effet, même si les méthodes existantes rattachées au domaine de la fiabilité sont nombreuses, elles concernent principalement les technologies électronique et mécanique (rarement le logiciel), et sont appliquées de manière indépendante à ces technologies sans tenir compte de l'intégration en synergie du produit mentionnée précédemment dans les définitions de la mécatronique. Durant ces dernières années, peu de travaux ont abordé cette thématique scientifique, citons les deux principales thèses qui ont traité de l'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques par A. Demri [1] et A. Mihalache [3]. A. Mihalache a développé une méthodologie d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle, expérimentale et opérationnelle alors que A. Demri s'est intéressé uniquement à la fiabilité prévisionnelle en prenant en compte la dynamique de ces systèmes. Même si ces travaux sont importants pour la communauté scientifique, ils ont néanmoins ignoré les autres caractères tels que reconfigurable, hybride et interactif qui sont à notre sens des caractères essentiels et nécessaires à l'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques.

A l'heure actuelle et malgré les travaux consentis depuis une dizaine d'années, il n'existe pas à notre connaissance d'approche permettant d'étudier la fiabilité d'un système mécatronique tout en prenant en considération l'ensemble des caractères mentionnés ainsi que les interactions générées entre les différentes parties technologiques. De plus, en raison de la complexité du domaine d'étude, les manques dans ce domaine sont nombreux et touchent plusieurs aspects : nombre croissant et éparpillement des méthodes, technologies nombreuses et différentes, plusieurs phases dans la vie du système, considération de l'aspect qualitatif et quantitatif, diversité des outils scientifiques disponibles, objectifs de l'étude, etc.

C'est sur cette problématique que nous proposons une approche globale pour étudier la fiabilité des systèmes mécatroniques pendant la phase de conception tout en prenant en considération les différents caractères ainsi que les interactions entre les différentes technologies et les besoins du secteur industriel concerné.

Le plan de cette communication est organisé comme suit. D'abord, nous présentons dans le paragraphe 2 la méthodologie proposée pour l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle et dédiée aux systèmes mécatroniques. Ensuite, les paragraphes de 2.1 à 2.7 détaillent les différentes étapes de cette méthodologie. Enfin, dans le paragraphe 3 nous proposons une conclusion et des perspectives pour ce travail.

## **2 Méthodologie d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques**

Notre approche est d'abord déclinée selon le cycle en V utilisé dans le développement de nouveaux produits qui peuvent être mécatroniques comme le montre la figure 1. Les différentes phases de ce cycle (spécification, conception, réalisation, vérification et validation) sont adaptées à la thématique scientifique considérée à savoir la fiabilité et les différentes méthodes existantes sont rattachées aux phases du cycle en fonction du niveau de développement.

Nous pouvons décliner sur ce schéma deux phases pendant lesquelles la fiabilité peut être évaluée mais de manière différente et en utilisant des techniques et méthodes différentes : la phase de conception pour la fiabilité prévisionnelle et la phase de fabrication pour la fiabilité expérimentale. En ce qui concerne ce travail

nous allons nous intéresser principalement à la phase de conception et décliner la méthodologie selon les différentes étapes descendantes du cycle en V.

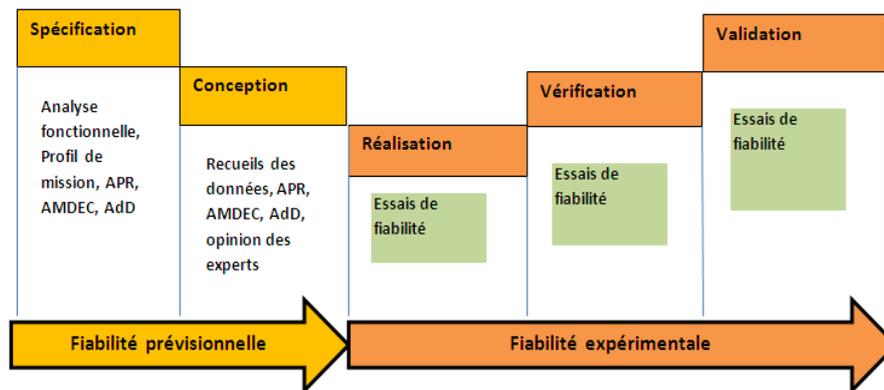


Figure 1 : Méthodes de fiabilité utilisées durant le cycle en V.

La figure 2 présente une schématisation simplifiée de la méthodologie sur laquelle nous nous appuyons avec ses principales étapes afin d'étudier la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques.

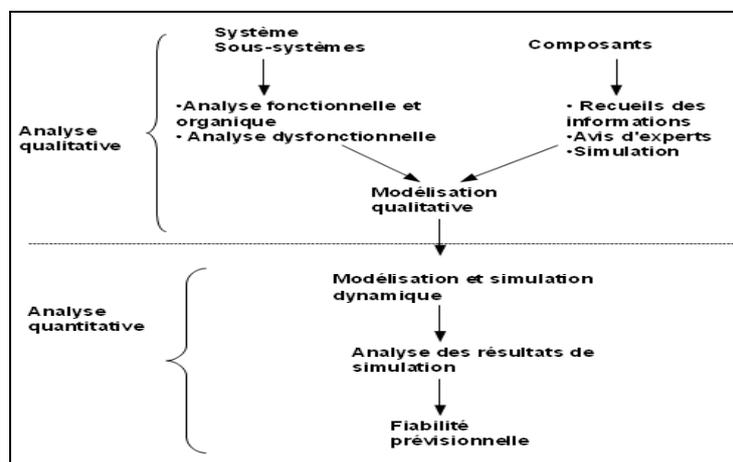


Figure 2 : Méthodologie globale pour déterminer la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques.

Afin de pouvoir déployer correctement la méthodologie proposée, dédiée aux systèmes mécatroniques et qui est fondée sur les caractéristiques intrinsèques des systèmes mécatroniques (dynamique, hybride, reconfigurable, interactif), il est absolument nécessaire de définir les éléments suivants : (i) le profil de mission, (ii) l'opinion des experts, (iii) l'analyse qualitative (analyses fonctionnelle et organique, analyse dysfonctionnelle, modélisations fonctionnelle et dysfonctionnelle), (iv) l'analyse quantitative (modélisation dynamique et simulation), (v) les différents niveaux qui doivent être traités : systèmes, sous-systèmes et composants. Nous décrivons dans les paragraphes suivants les principales étapes de cette méthodologie.

## 2.1 Analyses fonctionnelle et organique

L'**analyse fonctionnelle** permet la description des modes de fonctionnement du système étudié et des sous-systèmes identifiés ainsi que la connaissance de ses fonctions externes et internes à partir du profil de mission. L'analyse fonctionnelle est décomposée en deux parties :

- L'analyse fonctionnelle externe permet d'illustrer les relations entre le système et son milieu extérieur.
- L'analyse fonctionnelle interne a pour but de réaliser une décomposition arborescente du système en éléments. Elle décrit les fonctions du système mais aussi les relations entre les composants et par conséquent les *interactions* physiques entre les différentes entités du système. Elle doit également mettre en évidence les caractères *hybride*, *dynamique* et *reconfigurable* définis à ce niveau de l'analyse.

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser l'analyse fonctionnelle, notamment : APTE, SADT, FAST, arbre fonctionnel, UML, SysML etc. Elles sont toutes fondées sur l'expression du besoin du système et sa

spécification technique [2].

Pour l'étude des systèmes mécatroniques nous pouvons utiliser la méthode APTE pour l'analyse fonctionnelle externe qui permet d'illustrer les relations entre un système et son milieu extérieur. Après cette analyse, les fonctions internes au système ne sont pas déterminées et l'application d'une analyse fonctionnelle interne est nécessaire. Pour l'analyse fonctionnelle interne, la méthode SADT paraît adaptée pour au moins une raison, en particulier : cette méthode s'applique parfaitement aux systèmes pluri-technologies, c'est à dire qu'elle s'adapte aussi bien aux composants mécaniques et électroniques qu'au logiciel. Cependant elle ne prend pas en compte l'aspect dynamique. Aussi, il convient d'utiliser la méthode SART qui est une extension temps réel à l'analyse structurée. C'est une des méthodes les plus utilisées et elle permet de prendre en compte l'aspect dynamique, qui manque à la méthode SADT, d'un système mécatronique. D'autre part, depuis quelques temps, plusieurs améliorations sont apportées aux langages UML et SysML ce qui permet de traiter des systèmes mécatroniques en tenant compte, d'une part des différents caractères analysés précédemment et, d'autre part, des différents composants qui constituent le système [7]. Notre choix se porte cependant sur la méthode SART de manière préférentielle car elle permet une traduction ou une correspondance avec les réseaux de Petri [1].

**L'analyse organique** permet de définir l'architecture du système avec l'ensemble des organes et composants et de leurs interfaces pour répondre aux fonctions techniques attendues [8]. Les principales étapes pour la construction de l'architecture organique sont :

- Recherche des composants permettant de remplir les fonctions du produit et satisfaisant les exigences.
- Constitution de la matrice fonctions/composants permettant de reporter les interactions fonctionnelles listées au niveau système et au niveau de chaque composant, au travers du regroupement en organes.
- Analyse des interactions organe/organe pour déterminer les interactions entre les différents organes constituants d'une architecture primaire issue de l'analyse morphologique.
- Représentation de l'architecture organique qui permet de visualiser l'emplacement des différents composants ou organes ainsi que leurs liaisons.

## 2.2 Analyse dysfonctionnelle

L'analyse dysfonctionnelle a pour objectif d'identifier les différents modes de défaillance et de dégradation des différents composants du système et d'en voir l'effet sur le système. De plus, elle permet d'évaluer les modes de défaillance les plus critiques. Pour effectuer l'analyse dysfonctionnelle, nous avons besoin des informations obtenues suite aux analyses fonctionnelle et organique. En d'autres termes, les sorties ou les résultats des analyses fonctionnelle et organique constituent les entrées ou les bases de l'analyse dysfonctionnelle. Les principales méthodes utilisées lors d'une analyse dysfonctionnelle sont : l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC), l'Analyse des Effets des Erreurs de logiciel (AEEL), les Arbres de Défaillances (AdD), etc. [3]. La majorité de ces méthodes s'appliquent uniquement pour la partie matérielle (composants mécaniques, électroniques, etc.). Une de ces méthodes d'analyse dysfonctionnelle (AMDE) possède un équivalent qui s'adapte parfaitement à la partie logicielle c'est l'AEEL. La combinaison de ces deux techniques (AMDE + AEEL) nous permet de traiter un système mécatronique en tenant compte de l'aspect pluri-technologie.

Enfin, l'architecture du système mécatronique ayant été définie par l'analyse organique, des modes de défaillance issus des aspects hybride, dynamique, reconfigurable ou interactif pourront être identifiés lors de cette analyse.

## 2.3 Recueils d'informations

Le dysfonctionnement du système est provoqué par la défaillance d'un ou plusieurs composants. Les systèmes mécatroniques sont des systèmes complexes qui regroupent différentes technologies. Il est donc nécessaire de déterminer la fiabilité des différents types de composants qui constituent le système mécatronique. Il existe plusieurs sources d'informations où est synthétisée toute la connaissance disponible sur les paramètres influençant la fiabilité des composants. Parmi les sources les plus utilisées nous citons : les recueils d'informations (FIDES, NPRD, modèle de Musa), les avis d'experts, la simulation Monte Carlo.

## 2.4 Modélisation qualitative

La modélisation qualitative permet de construire, un modèle fonctionnel et dysfonctionnel et ainsi de

représenter le comportement du système durant son fonctionnement nominal et en présence de fautes. Les deux étapes des analyses fonctionnelle et organique et de l'analyse dysfonctionnelle sont nécessaires à la construction des modèles fonctionnels et dysfonctionnels. Les résultats de ces deux analyses constituent le point de départ dans la construction du modèle de fiabilité. Il existe plusieurs méthodes de modélisation des systèmes mécatroniques, nous pouvons citer : les RDP [5], les chaînes de Markov [10], les réseaux bayésiens dynamiques (RBD) [11], les réseaux de neurones [9], etc. Les méthodes les plus adaptées à la modélisation et à l'analyse des systèmes mécatroniques sont les modèles à états-transitions tels que les graphes d'états (les graphes de Markov, les réseaux bayésiens) et les approches basées sur les réseaux de Petri [4]. Pour la modélisation des systèmes mécatroniques, nous pouvons utiliser les réseaux de Petri car ils permettent :

- La modélisation d'un système mécatronique intégrant différentes technologies ;
- L'utilisation dans chaque étape du cycle de développement ;
- L'analyse du comportement fonctionnel et dysfonctionnel ;
- La modélisation de phénomènes continus et d'évènements discrets (aspect hybride)
- La prise en compte de l'aspect dynamique du système ;
- La modification de leurs structures internes (aspect reconfigurable)
- La spécification des interactions entre les composants.

L'un des inconvénients des réseaux de Petri pourrait se limiter à son application dans le domaine industriel par manque d'utilisation.

## 2.5 Modélisation dynamique

La modélisation dynamique constitue la première étape de l'analyse quantitative qui consiste à évaluer la probabilité d'apparition d'un évènement pouvant se produire sur un système.

Cette modélisation consiste, d'une part, à construire un modèle (représentant le système avec ses interactions fonctionnelles et physiques) et qui prend en compte les différentes propriétés citées auparavant (dynamique, reconfigurable, interactif et hybride) du système mécatronique afin d'obtenir les variables physiques internes à partir d'un profil de mission ; d'autre part, de construire les lois de distribution de la fiabilité des composants constituant le système mécatronique si elles n'existent pas *a priori* [1].

Les modélisations dynamiques fonctionnelle et dysfonctionnelle du système, tenant compte du profil de mission, et les résultats de la modélisation qualitative fonctionnelle et dysfonctionnelle permettent de connaître les variables internes et les temps de fonctionnement de chaque composant.

En cas d'absence de loi de distribution concernant la fiabilité des composants, les variables physiques internes obtenues seront utilisées comme données pour déterminer ces lois de distribution pour chaque technologie. Habituellement, pour les composants électroniques, la loi exponentielle est tout à fait adaptée pour représenter les défaillances. Pour les composants logiciels, le modèle de Musa peut être utilisé. Enfin, pour les composants mécaniques standards, la loi normale peut être appliquée dans certains cas de dégradation, et on peut utiliser les recueils de données (NPRD, AVCO, etc.). La loi de Weibull avec ses différentes extensions (2 ou 3 paramètres, composée, mixée) est très riche et peut être utilisée pour différentes technologies et pendant les différentes phases du cycle de vie du produit.

## 2.6 Simulation

La simulation consiste à exécuter, c'est-à-dire à faire fonctionner pas à pas et évènement par évènement dans le temps, le modèle construit grâce à l'enchaînement des différentes étapes citées précédemment afin d'estimer la fiabilité du système dans sa globalité et de détecter les différents modes de fonctionnement et de dysfonctionnement. La simulation permet aussi d'identifier les différents états de fonctionnement du système considérés dans le modèle : fonctionnement normal, fonctionnement dégradé (en présence de fautes), fonctionnement défaillant.

## 2.7 Analyse des résultats de simulation

L'analyse des résultats de simulation consiste à évaluer les valeurs de fiabilité obtenues et de comparer ces valeurs par rapport aux objectifs définis lors de la phase de spécification afin d'améliorer la qualité du système du point de vue de la fiabilité. Aussi, cette analyse permettra de rechercher les lois ou modèles de fiabilité adaptés aux différents modes de défaillance et aux différents composants.

A l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance (ou en utilisant des méthodes statistiques), nous pouvons déduire les paramètres des lois de distribution de la fiabilité car cette méthode consiste à évaluer la vraisemblance des observations, c'est-à-dire la probabilité d'avoir obtenu un certain nombre de défaillances.

Nous supposons que l'utilisation de cette méthodologie avec toutes ses étapes et en intégrant les aspects caractérisant un système mécatronique devrait nous permettre de mettre en évidence des modes de défaillance dus aux spécificités de ces systèmes mais aussi une évaluation plus robuste de la fiabilité.

### 3 Conclusion et Perspectives

Dans cet article, nous avons exposé la problématique liée à la fiabilité des systèmes mécatroniques et nous avons proposé une méthodologie globale dans le but de faire face aux problèmes engendrés par les spécificités de ces systèmes lors de l'étude de fiabilité pendant la phase de conception. Pour évaluer la fiabilité prévisionnelle d'un système mécatronique, il est nécessaire de le modéliser car le système n'existe pas à ce stade de développement et ne peut être testé physiquement. C'est pourquoi, la première partie de la méthodologie proposée est l'analyse qualitative qui fournit toutes les informations nécessaires sur le fonctionnement et le dysfonctionnement d'un système mécatronique. La deuxième partie de la méthodologie est l'analyse quantitative qui permet d'estimer et de quantifier la fiabilité de ce système mécatronique.

En termes de perspectives, nous comptons valider cette méthodologie dans un délai proche à travers des exemples mécatroniques industriels. Ces exemples seront choisis en collaboration étroite avec notre partenaire le CETIM qui a des relations très privilégiées avec plusieurs entreprises travaillant dans le domaine. Aussi, nous comptons approfondir notre analyse sur des questions plus théoriques, afin de répondre en particulier à des problèmes de spécification et de modélisation par exemple, des interactions physiques ou fonctionnelles en termes de fiabilité et de l'influence du profil de mission sur les lois de distribution de la fiabilité des composants.

**Remerciements :** Nous tenons à remercier l'APS (Assemblée des Pays de Savoie) et le CETIM qui financent ce travail dans le cadre d'une thèse de doctorat.

### Références

- [1] A. Demri ; Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle ; thèse de doctorat, Université d'Angers, 2009.
- [2] P. Lyonnet ; Ingénierie de la fiabilité ; Lavoisier, 2006.
- [3] A. Mihalache ; Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué ; thèse de doctorat, Université d'Angers, 2007.
- [4] M. Medjoudj ; Contribution à l'analyse des systèmes pilotés par calculateurs : Extraction de scénarios redoutés et vérification de contraintes temporelles ; thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2006.
- [5] G. Moncelet ; Application des Réseaux de Petri à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde automobile ; thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, octobre 1998.
- [6] "Systèmes dynamiques hybrides", ouvrage collectif sous la direction de Janan Zaytoon, collection Hermès Science, ISBN 2-7462-0247-6, 2000.
- [7] P.A.Muller et N.Gaertner. Modélisation objet avec UML. Editions Eyrolles, 2001.
- [8] « Guide de conduite d'un projet mécatronique. Analyse fonctionnelle et organique », CETIM 2007.
- [9] S. Piechowiak ; Intelligence artificielle et diagnostic, Technique de l'ingénieur, page 20, décembre 2003.
- [10] A. Villemeur ; Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Editions, 1988.
- [11] S. Verron. Diagnostic et surveillance des processus complexes par réseaux bayésiens. Thèse de doctorat, ISTIA - Université d'Angers, 2007.
- [12] AFNOR. Mécatronique - vocabulaire. Norme NF E01-010, novembre 2008.
- [13] C. Commault, J.M. Dion, A. Perez, Disturbance rejection for structured systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 36(7):884-887, juillet 1991.
- [14] R.W Daniel,, J.R. Hewit, Editorial. Mechatronics, 1(1): i-ii, 1991.
- [15] IFAC Technical Committees. [Http: //tc.ifac-control.org/4/2/scope](http://tc.ifac-control.org/4/2/scope). 2009.