



THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ LILLE 1

Spécialité

Automatique et Informatique industrielle

Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille 1,
UMR 9189

Ecole doctorale Sciences de l'Ingénieur de Lille EDSPI 072

Présenté par

Zine-eddine MEGUETTA

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ LILLE 1

Sujet de la thèse :

**Méthodologie de conception sûre de fonctionnement
d'un système de contrôle-commande**

Soutenue publiquement le 20 Juillet 2015

Devant le jury composé de :

Pr. Christophe AUBRUN	Rapporteur, CRAN, Université de Lorraine
HDR. Kamal MEDJAHER	Rapporteur, FEMTO-ST, ENS2M Besançon
Pr. Etienne CRAYE	Examineur, ESIGELEC, Rouen
Dr. Olaf MALASSE	Examineur, LCFC, ENSAM Metz
Pr. Mireille BAYART	Directrice de thèse, CRISTAL, Université de Lille1
Dr. Blaise CONRARD	Co-encadrant, CRISTAL, Université de Lille1

Résumé

Cette thèse s'intéresse au problème de la conception de l'architecture d'instrumentation des systèmes de contrôle— commande (C—C). La conception de telles architectures est une activité complexe qui nécessite une vision globale du système. Plus spécifiquement, elle consiste à déterminer l'ensemble des instruments utilisés (nombre et type des capteurs, des actionneurs), leur agencement vis-à-vis du système de C—C.

Pour être menée à bien, cette sélection nécessite d'avoir probablement identifié les différentes possibilités quant à la conduite du processus. Ces choix sont contraints par plusieurs critères, d'une part, le coût du système et des différents composants qui se doit d'être minimal, d'autre part, la sûreté de fonctionnement qui s'évalue en terme de la fiabilité d'accomplissement de la mission et enfin par les critères de performances du système à concevoir. Ce domaine de recherche vise à unifier les différentes approches utilisées en automatique, en une méthodologie globale de conception d'architectures de C—C.

Ce sujet de thèse s'intéresse à la conception de l'instrumentation d'un système de C—C. Il propose une méthode qui vise à optimiser cette instrumentation sous multicritère : le coût et le critère de sûreté de fonctionnement en fonction de la fiabilité ou le critère de qualité de commande ou le niveau de tolérance aux pannes ; cette procédure de conception s'appuie sur un modèle structurel.

Cette étude portera sur des systèmes C-C pour l'accomplissement de diverses missions, sans s'intéresser à la représentation interne du système (les équations d'état) mais en utilisant l'analyse structurelle du système : elle se place dès la phase de conception dans le cycle de vie du système.

L'intégration de l'aspect de la sûreté de fonctionnement dans la procédure de la méthodologie de conception d'un système C-C peut apparaître ici sous la forme de l'évaluation de fiabilité d'accomplissement de la mission en se basant sur les liens (les liens structurels entre les variables physiques à commander et les instruments) des systèmes étudiés et éventuellement le conditionnement de leur conception sur la base de niveaux de performance et spécification des objectifs exigés.

Mots Clés : Conception, Analyse Structurelle, Fiabilité, Qualité de Commande, Coût, Niveau de Tolérance aux Pannes.

Abstract

This thesis concerns the design of control system instrumentation architecture. The design of such architectures is a complex activity that requires a global vision of the system. More specifically, it consists to determine the set of instruments (number and type of sensors, actuators), their arrangement according the control system instrumentation.

The choice of architecture constrains by main multi criteria's, on the one hand, the cost of the system and the various components that must be minimal, on the other hand, the dependability, which is evaluated in terms of the reliability of fulfillment of the mission of the design system. This field of research aims to unify different approaches used in automatic in a global design methodology of control system instrumentation.

This work proposes a method that aims to optimize the instrumentation using multiple criteria : cost criterion and dependability constraints in terms of reliability, quality of control, quality of performance, fault tolerant level. This design methodology is based on structural modeling.

This study will focus on control systems to accomplish various missions without take into account the internal representation of the system (state equations). However, the tool of structural analysis is used for modeling of the system in design phase.

The integration of the dependability aspect in the design methodology procedure of control system instrumentation may appear here in the form of the assessment of reliability mission based on structural links between the physical variables and instruments of the system, according to the performance levels and specifications of the required objective design.

Key words : Design, Structural Analysis, Reliability, Quality of Control, Cost, Fault Tolerant Level.

Dédicace

Le plus grand merci revient à dieu qui est le seul guide dans le bon sens durant ma vie.

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère mère

A mon cher père

Pour ces deux êtres les plus chers de ma vie, pour leurs sacrifices et leur soutien tout au long de mes études

A mes chers frères

A mes chères soeurs

A toute ma famille

A tous mes amis

Remerciements

J'exprime toute ma profonde gratitude à mes encadrants, non seulement pour leur encadrement de très haut niveau, leurs précieux conseils et orientations, mais également pour leur disponibilité et leur dévouement, pour leur patience, leur avis, leurs conversations, leur soutien et leur confiance, dont j'ai bénéficiés à tous leur égards.

Je les remercie de m'avoir toujours poussé vers l'avant, pour la confiance qu'il ont porté en moi et qui m'a permis d'acquérir une précieuse expérience dans le domaine de recherche.

Ces travaux de recherche ont été réalisés au laboratoire de recherche LAGIS université de Lille-1.

Enfin, merci à mes parents pour toute l'éducation qu'ils m'ont inculquée et surtout de m'avoir encouragé et permis de réaliser une thèse de doctorat.

Introduction générale

L'objectif de la conception d'un système contrôle– commande C-C vise essentiellement la recherche de l'architecture matérielle du système étudié, c'est-à-dire la détermination de ses composants et son organisation. Cependant, un système contrôle– commande n'est, en général, pas conçu pour accomplir une unique tâche mais plutôt un ensemble de missions. Ainsi, le plus souvent, il a en charge la commande du processus selon plusieurs phases de fonctionnement, tout en effectuant des activités de surveillance (détection, localisation, identification des défaillances) et en réagissant en cas de défaut ou panne détectée. Dans ce contexte, la recherche d'instruments communs (capteurs et actionneurs) à la réalisation de plusieurs missions dans plusieurs phases de fonctionnement permet de réduire le coût économique du système C–C. En contrepartie, l'emploi de ressources communes risque d'aboutir à la perte simultanée de plusieurs fonctions suite à la panne ou la défaillance d'un unique instrument utilisé par ces fonctions. Ainsi, la conception d'un système C–C peut être posée comme un problème d'optimisation dont l'objectif est la recherche d'un compromis entre son coût et sa capacité à tolérer les défaillances ou bien le niveau de qualité de commande QoC .

Les premières étapes de conception se caractérisent par une faiblesse des données disponibles au concepteur. En effet, de nombreux choix n'ont pas encore été arrêtés telle que la politique de maintenance, le choix exact des fournisseurs ou encore le dimensionnement exact de certaines pièces. De même, concernant la sûreté de fonctionnement, les caractéristiques exactes et précises de tous les instruments proposés au concepteur, ne lui sont pas connues ou pourraient l'être mais au prix d'un effort disproportionné par rapport aux objectifs du moment. Ainsi dans ce contexte, une évaluation des critères de coût et de sûreté de fonctionnement SdF est recherchée.

La démarche de conception d'un système C–C est une activité complexe qui conduit à déterminer l'instrumentation, c'est-à-dire, un ensemble de capteurs et d'actionneurs qui permette au système d'accomplir sa mission en dépit de la perturbation de l'un ou de plusieurs de ses instruments.

La démarche traditionnelle de conception d'un système contrôle– commande C-C peut s'apparenter à une activité bouclée. A partir d'une première solution potentielle d'architecture, le concepteur évalue ses caractéristiques (coût C_i , fonction de tolérance aux pannes NTP , fiabilité $R(t)$, qualité de commande QoC , qualité de performance QoP , qualité de service QoS pour un système distribué..), puis en détermine les points faibles et les améliorations possibles et enfin réitère ce cycle jusqu'à aboutir à une solution acceptable vis-à-vis de différents critères techniques et économiques.

Afin d'éviter ce bouclage qui n'assure pas d'avoir envisagé toutes les solutions possibles une démarche linéaire est proposée. Elle consiste à fournir une description du processus à instrumenter dont toutes les architectures possibles de système C–C pourront être indirectement déduites puis comparées pour, en final, présenter au concepteur les meilleures selon des critères et des contraintes imposés par le concepteur.

Les systèmes industriels complexes C–C se caractérisent par le résultat d'une combinaison de sous-systèmes de technologies différentes.

On s'intéresse, dans cette thèse, aux premières phases de développement d'un système, celle consiste à l'analyse des besoins et des spécifications, puis celle de développement du système.

Le concepteur évalue les caractéristiques (coût, fiabilité, qualité de commande, niveau de tolérance aux pannes), pour pouvoir sélectionner l'architecture la mieux adaptée.

Le mémoire est structuré en cinq chapitres suivis d'une conclusion générale :

Le premier chapitre rappelle les démarches générales de conception d'un système de C–C. Dans cette section, nous parlerons tout spécialement de la conception multicritère (économique, technique physique, impact environnemental) de systèmes C-C. Cette section expliquera les spécificités des premières phases de conception, en discutant sur la conception classique par le cycle en V et la formulation de la méthodologie de conception pour notre cas.

Le deuxième chapitre de ce mémoire présentera quelques aspects sur la modélisation structurelle, et expliquera la motivation qui nous a amenés à préférer cet outil dès la phase de conception. La motivation du choix de l'approche de l'analyse structurelle est que cette analyse est un outil rapide pour trouver les liens structurels entre les contraintes et les variables physiques du système étudié, de cette façon elle peut donc être appliquée dès les phases initiales de la démarche de conception du système C–C.

Plus précisément, la méthode de conception proposée se décompose en deux étapes. La première descriptive consiste en une modélisation du processus et une spécification des cas de fonctionnement, du niveau associé de multi critères à retenir par le concepteur (la qualité de commande et du coût des différents instruments potentiellement implantables sur le processus, niveau de tolérance aux pannes, la fiabilité..). La seconde étape revient à construire le problème d'optimisation intégrant la spécification de l'un des critères de performances retenu et le critère de coût financier et à résoudre ce problème pour obtenir des architectures potentiellement utilisables répondant aux spécifications et besoins de concepteur.

Nous définirons le modèle structurel et les paramètres nécessaires pour traiter la problématique de conception. L'étape suivante est l'implémentation de la procédure de conception optimale pour les différents critères retenus.

Un ensemble de paramètres concernant la définition du problème d'optimisation doit être défini par le concepteur avant l'implémentation de la méthodologie de conception. Il est présenté en détail et analysé avec l'aide de tableaux descriptifs de système à concevoir. Dans cette thèse, l'application retenue est celle d'un véhicule électrique qui se déplace sur une route avec des pentes variables. Ce modèle est étudié dans tous les chapitres, des hypothèses et des informations sont additionnées au modèle d'un chapitre à l'autre. Nous présenterons trois critères de performance retenus (qualité de commande, niveau de tolérance aux pannes, fiabilité) chacun fait l'objet d'un chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous nous intéressons à la conception de l'instrumentation d'un véhicule grâce à une modélisation structurelle sous un critère d'optimisation de la qualité de commande QoC et de coût. La qualité de commande QoC concerne la capacité de garantir la robustesse d'un système C-C en phase de conception, elle dépend essentiellement de l'algorithme de recherche des chemins de la commande $u(t)$ en se basant sur le modèle structurel, QoC est définie par une fonction de toutes les perturbations trouvées dans l'architecture admissible pour accéder à la grandeur physique de la mission visée.

Pour l'application de nos travaux, nous nous intéressons à un véhicule électrique, la qualité de commande pour atteindre une bonne conception robuste est jugée par les incertitudes des mesures des instruments (ici, les capteurs) et les perturbations issues de la variation de la pente de la route.

Dans le quatrième chapitre, nous traitons la même problématique de la démarche de conception, mais cette fois, nous considérons la Tolérance aux Pannes (NTP) comme critère de performance, la fonction (NTP) consiste à fixer le nombre minimal de défaillances que le système doit pouvoir supporter.

La phase finale d'optimisation consiste alors à déterminer l'instrumentation qui, à moindre coût, lui permet de tolérer le nombre imposé de défaillances. La méthode présentée utilise la modélisation structurelle expliquée dans le chapitre précédent.

La fonction $NTP(q)$ exprime la capacité du système à réaliser l'estimation de la grandeur physique q en présence de défaillances et évalue ainsi le niveau de tolérance aux pannes en prenant compte l'expression structurelle de la grandeur physique q concernant la mission fixée par le concepteur.

Dans le cinquième chapitre, il s'agit dans un premier temps, de développer une méthodologie générique permettant une évaluation de la fiabilité à base des liens structurels des systèmes C-C, en intégrant les paramètres de la sûreté de fonctionnement des instruments. En utilisant les outils graphiques de l'analyse structurelle, qui constituent un modèle représentant les liens structurels entre les variables et les contraintes du système à concevoir, nous mettons en relation ces graphes avec les équipements des instruments pour évaluer leur fiabilité ; ce qui implique de connaître la durée de mission effectuée.

L'hypothèse d'indépendance des probabilités de panne des composants est utili-

sée. Par ailleurs, aucune défaillance de mode commun n'est prise en compte. Les lois de fiabilité utilisées pour les composants peuvent être de toute nature. De celles ci, la quantification de la fiabilité est réalisée par des arbres de décision, version simplifiée des arbres de Shannon. La quantification de ces arbres consiste à évaluer les probabilités de réussite de la mission fixée (en vérifiant le diagramme de la fiabilité de la mission) selon celles de ces variables.

Nous terminons ce chapitre avec les résultats obtenus lors de l'application de notre méthodologie de conception proposée sur l'exemple retenu.

Enfin, une conclusion et des perspectives terminent le corps principal du mémoire.

Les travaux de recherche de ma thèse ont conduit aux publications suivantes :

Reuves internationales avec comité de lecture :

Zine–Eddine Meguetta, Blaise Conrard, Mireille Bayart. Design methodology of a reliable control system using structural analysis approach. *International Journal of Systems Science : Operations Logistics* pp. 1 – 9, [www.tandfonline.com/DOI : 10.1080/23302674.2015.1039626](http://www.tandfonline.com/DOI:10.1080/23302674.2015.1039626).

Zine-Eddine Meguetta, Blaise Conrard, Mireille Bayart. Multi–criteria design optimization of control system instrumentation using Principal Component Analysis (*PCA*) and structural modeling approaches. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)* : www.ijeat.org, ISSN : 2249 8958, Volume-4 Issue-2, December 2014.

Zine–eddine Meguetta, Blaise Conrard and Mireille Bayart. Design of control system instrumentation based on structural modeling with criteria of quality of control (*QoC*) and cost, *IJISSET International Journal of Innovative Science Engineering and Technology* : www.ijiset.com, Vol.1 Issue9 : ISSN23487968, November 2014.

Zine-eddine Meguetta, Blaise Conrard and Mireille Bayart. Robust Design of a Control System Instrumentation Using Structural Analysis and ANFIS Neuro-Fuzzy Logic Approaches, *Journal of Consumer Electronics Times (CET), Focus and Scope : Automobile Electronics* : www.academicpub.org; World Academic Publishing Inc, 09 october 2014.

Conférences internationales avec comité de lecture :

Z-E.Meguetta and B.Conrard, M.Bayart, Instrumentation for electrical vehicle model on road slope using structural analysis, 20th Mediterranean conference on control and automation(MED), Barcelona, Spain, july 3 – 6, 2012.

Z-E.Meguetta and B.Conrard, M.Bayart, Design of control architecture based search algorithm for fault-tolerant control system. 2nd International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems, Nice, France, October 9 – 11, 2013.

Z-E.Meguetta and B.Conrard, M.Bayart, Conception de l'instrumentation d'un véhicule grâce à une modélisation structurelle sous un critère d'optimisation de la qualité de commande et du coût, QUALITA'2013, 10 ème Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sûreté de Fonctionnement, Compiègne, France, 19 – 22 mars, 2013.

Z-E.Meguetta, Blaise Conrard, Mireille Bayart. Design of Control System Instrumentation Using Reliability Criteria. Conférence Safe Process 2015, Paris, France, september 2–4, 2015.

Conférence nationale avec comité de lecture :

Z-E.Meguetta, B.Conrard et M.Bayart, Conception optimale d'architecture de système sûr de fonctionnement sur la base d'une modélisation structurelle. Congrès lambda mu 19, 21 – 23 octobre 2014 à Dijon.

Table des figures

1.1	Le principe général d'un système C–C	2
1.2	Dépendance entre les quatre caractéristiques de sûreté de fonctionnement	5
1.3	Le cycle en V	6
1.4	La démarche générale de la méthodologie de conception proposée	8
1.5	Les étapes de l'algorithme génétique	16
2.1	Les variables	21
2.2	Exemple de décomposition par l'analyse fonctionnelle	23
2.3	Le principe général de la modélisation topologique	24
2.4	Représentation du système par un graphe biparti	26
2.5	Représentation du système par Bond Graph	27
2.6	Graphe biparti pour la transposition du modèle structurel	29
2.7	Graphe biparti pour la distinction structurelle	29
2.8	Graphe biparti pour x_1 et \dot{x}_1 structurellement identiques	30
2.9	Représentation de graphe par liste des successeurs	31
2.10	Le graphe élémentaire	31
2.11	Recherche en largeur	33
2.12	Recherche en profondeur	33
2.13	Système à 3 tuyaux	39
2.14	Exemple de trois tuyaux avec débitmètres	39
2.15	Exemple de trois tuyaux avec deux valves	40
2.16	Système composé de trois tuyaux avec un détecteur de débit	42
2.17	Principe de l'algorithme de recherche sous forme organigramme	44
2.18	Les chemins d'évaluation de la variable a	46
2.19	Figure simplifiée de l'exemple 1 en appliquant l'algorithme de facteur commun	48
2.20	Figure d'un système complexe sans l'algorithme de facteur commun	48
2.21	Figure simplifiée de l'exemple 2 avec l'application de l'algorithme de facteur commun	50
2.22	Figure compliquée de l'exemple 2 sans l'application de l'algorithme de facteur commun	50
3.1	Méthodologie de conception d'un système C–C	56
3.2	Les chemins d'évaluation de la variable a	57
3.3	Route ondulée avec pente variable	59
3.4	Modèle dynamique de véhicule électrique	60
3.5	Les différents chemins pour évaluer la commande u_t avec plusieurs perturbations	65

3.6	Architecture admissible 1	67
3.7	Architecture admissible 2	68
3.8	Architecture admissible 3	69
3.9	Architecture admissible 4	70
3.10	Architecture admissible 5	71
4.1	Système à deux vannes	77
4.2	Système de deux véhicules	80
4.3	Etude de la tolérance aux pannes sur l'architecture admissible 2	85
4.4	Etude de la tolérance aux pannes sur l'architecture admissible 1	86
4.5	Etude de la tolérance aux pannes sur l'architecture admissible 3	87
4.6	Etude de la tolérance aux pannes sur l'architecture admissible 4	88
4.7	Etude de la tolérance aux pannes sur l'architecture admissible 5	89
5.1	Le concept de l'approche de conception en utilisant les contraintes de sûreté de fonctionnement et le critère du coût pour un système de C–C	94
5.2	La démarche détaillée de la conception d'architecture de système sûr de fonctionnement	96
5.3	Le véhicule électrique se déplace sur une route plate	99
5.4	Arbre de décision à base du diagramme de fiabilité	103
5.5	Le passage de représentation structurelle sous des variables du sys- tème vers une représentation des équipements	104
5.6	L'arbre graphique représentant les différents liens structurels du sys- tème global	110
5.7	Le diagramme de fiabilité de la mission de contrôle $v_{t+\delta t}$	113
5.8	L'évaluation de la fiabilité de la mission de contrôle de la vitesse $v_{t+\delta t}$ en fonction du temps (unité l'heure)	114
5.9	Le diagramme de fiabilité en utilisant les variables des systèmes pour la mission de contrôler l'accélération a_t	114
5.10	Le diagramme de fiabilité en utilisant les équipements du système de la mission de contrôler l'accélération a_t	115
5.11	L'évaluation de la fiabilité de la mission de contrôle de l'accélération a_t en fonction du temps (unité de l'heure)	116
5.12	La courbe d'évaluation du critère de fiabilité $R(t)$ en fonction du critère de coût	118

Table des matières

1	Méthodologie générale de la conception optimale d'architecture de système C–C	1
1.1	Introduction	1
1.2	Généralités et définitions d'un système C–C	2
1.2.1	Définition d'un système contrôle–commande	2
1.2.2	Techniques de contrôle–commande	2
1.3	Système sûr de fonctionnement	3
1.3.1	La sûreté de fonctionnement	4
1.3.2	Les caractéristiques de la sûreté de fonctionnement	4
1.4	Formulation du problème de conception du système	5
1.4.1	Outil classique de conception : le cycle en V	6
1.4.2	Conception d'un système	8
1.5	Modélisation utilisée dans la méthodologie de conception proposée	9
1.6	Définition des critères des performances à retenir dans l'approche de conception proposée	10
1.6.1	Critère du coût	10
1.6.2	Critère de la qualité de commande QoC	11
1.6.3	Critère du niveau de tolérance aux pannes	11
1.6.4	Sûreté de fonctionnement : Critère de fiabilité	11
1.6.5	L'énoncé de problème d'optimisation	12
1.6.5.1	La démarche d'optimisation	12
1.6.5.2	Spécification des contraintes et critères retenus	12
1.6.5.3	Procédure de décision multicritères : choix de la meilleure architecture d'instrumentation	13
1.7	Approches de résolution des problèmes d'optimisation	13
1.7.1	Travaux récents relatifs au problème d'optimisation multicritère	13
1.7.2	Méthodes classiques de résolution multicritère du problème d'optimisation	14
1.7.2.1	Méthodes déterministes	14
1.7.2.2	Méthode de Recuit Simulé	15
1.7.2.3	Algorithmes génétiques	15
1.7.2.4	Algorithme de colonies de fourmis	17
1.7.3	Méthodes d'optimisation multicritère	17
1.7.3.1	Méthode de ϵ –contraintes	17
1.7.3.2	Méthode de pondération	18
1.8	Conclusion	18

2	Modélisation structurelle	20
2.1	Introduction	20
2.2	Système physique	20
2.2.1	Les variables	20
2.2.2	Les relations	21
2.2.3	Les différentes représentations d'un modèle physique	21
2.2.3.1	La représentation comportementale	22
2.2.3.2	La représentation fonctionnelle	22
2.2.3.3	La représentation topologique	22
2.2.4	L'approche structurelle	23
2.2.5	Les différentes représentations graphiques par l'approche structurelle	24
2.2.5.1	Modélisation structurelle par un graphe biparti	24
2.2.5.2	Exemple illustratif sur la représentation par graphe biparti et matrice d'incidence	25
2.2.5.3	Représentation graphique par bond graph	26
2.2.5.4	Modélisation structurelle par digraph	26
2.2.5.5	Modélisation des variables dynamiques et des dérivées	28
2.2.5.6	Transposition du modèle structurel du continu à l'échantillonné	28
2.2.5.7	Distinction structurelle	29
2.2.5.8	Les variables et leurs dérivées représentées par les mêmes variables :	30
2.3	Les outils de la théorie des graphes	30
2.3.1	La recherche des chemins structurels	30
2.3.1.1	Les outils algorithmiques de recherche dans les arbres	30
2.3.2	Définition de la matrice d'incidence	31
2.3.3	Recherche en profondeur et en largeur	32
2.3.3.1	Principe général :	32
2.3.3.2	Exemple sur la recherche en profondeur et en largeur	33
2.3.3.3	Recherche en largeur :	33
2.3.3.4	Recherche en profondeur :	33
2.3.4	L'algorithme du plus court chemin	33
2.3.5	La réécriture et la simplification des formules structurelles	35
2.3.5.1	Méthode de coalescence	35
2.3.5.2	Algorithme de facteurs communs	35
2.4	Limites de l'analyse structurelle	37
2.5	Approche proposée	38
2.5.1	Variables connues et inconnues	38
2.5.2	Modes de fonctionnement	40
2.5.3	Exemple de l'estimation d'une grandeur physique par l'analyse structurelle	40
2.5.4	Contraintes non-inversibles	41
2.5.5	L'analyse structurelle—système d'état discret	42
2.5.6	Concept de recherche exhaustive	43
2.5.6.1	Algorithme de recherche	43
2.5.6.2	Exemple d'application du principe général de l'algorithme de recherche	45

2.6	Conclusion	51
3	Conception de l'instrumentation d'un système C–C grâce à une modélisation structurelle sous un critère d'optimisation de la qualité de commande et du coût	52
3.1	Introduction	52
3.2	Démarche de conception	54
3.3	Algorithme de recherche de la commande	55
3.4	Formalisation et résolution du problème d'optimisation	57
3.4.1	Spécification des contraintes de la qualité de commande	57
3.4.2	Construction et résolution du problème d'optimisation	58
3.5	Cas d'étude : Conception de l'instrumentation d'un véhicule électrique	58
3.5.1	Objectif et l'intérêt de la modélisation structurelle	58
3.5.2	Description du processus	59
3.5.3	Résultat de l'algorithme sur le véhicule électrique	62
3.5.4	Modélisation structurelle du véhicule électrique	64
3.6	Application <i>QoC</i> sur notre cas d'étude	64
3.6.1	Spécification sur <i>QoC</i>	64
3.6.2	La recherche des architectures admissibles	66
3.6.3	L'application sur notre cas d'étude	66
3.7	Conclusion	73
4	La conception d'architecture optimale du système C–C à base d'un algorithme de recherche sous bi–critères : le niveau de la tolérance aux pannes (fautes) <i>NTP</i>, le coût	74
4.1	Introduction	74
4.2	Concept sur la conception d'un système C–C	75
4.3	Conception d'un système d'instrumentation tolérant aux fautes	75
4.4	Exemple d'application	76
4.4.1	Analyse structurelle	76
4.4.2	Les propriétés du niveau de tolérance aux pannes :	78
4.5	Formalisation et résolution du problème d'optimisation	78
4.5.1	Spécification des contraintes de tolérance aux pannes	78
4.5.2	Construction du problème d'optimisation	78
4.5.3	Résolution du problème d'optimisation	79
4.6	Exemple d'illustration de l'approche proposée	80
4.6.1	Description générale	80
4.6.2	L'analyse structurelle	81
4.6.3	Résultat de l'optimisation	82
4.7	Résultats de la conception bi–critères (<i>NTP</i> , coût) sur le véhicule électrique	83
4.7.1	Description de processus	83
4.7.2	L'analyse structurelle	84
4.7.3	Les résultats de la phase d'optimisation	86
4.8	Conclusion	92

5	Conception optimale d'architecture de système C–C sûre de fonctionnement sur la base d'une modélisation structurelle	93
5.1	Introduction	93
5.2	Contexte :	94
5.3	Concepts généraux relatifs à la conception du système C–C fiable . .	95
5.4	Méthodes d'évaluation de la fiabilité :	97
5.4.1	En utilisant le taux de défaillance :	97
5.4.2	En utilisant les caractéristiques temporelles	97
5.4.3	En utilisant le nombre de tolérance aux pannes	98
5.5	La démarche de conception d'un système contrôle – commande . . .	98
5.5.1	La phase de modélisation	98
5.5.2	La phase d'évaluation de la fiabilité de la mission $R_{mission}$. .	101
5.5.3	La phase de l'optimisation	105
5.6	Cas d'étude : Conception sûre de fonctionnement d'un véhicule électrique	106
5.6.1	Description du système	106
5.6.2	Modélisation structurelle de véhicule électrique :	108
5.6.3	Construction de la matrice d'incidence globale pour le système complet :	108
5.6.4	L'analyse structurelle :	109
5.6.5	Le résultat de l'évaluation de la fiabilité dans le véhicule électrique	112
5.6.6	La phase de l'optimisation	116
5.7	Conclusion	118

Chapitre 1

Méthodologie générale de la conception optimale d'architecture de système C–C

1.1 Introduction

La démarche de conception des systèmes sûrs de fonctionnement est importante d'un point de vue industriel. Elle fait l'objet de nombreuses études et publications dans le domaine de la mécatronique (**Mechraoui,2010**) (**Mechraoui,2011**). L'analyse de cette problématique fait appel aux méthodes d'optimisation qui se manifestent par des outils puissants d'aide à la décision (**Bhaskar,2000**) (**Dietz,2004**).

Dans la majorité des travaux, la phase d'optimisation repose sur des critères techniques–économiques, prenant en compte le coût total d'investissement ou le bénéfice actualisé. Cependant, les objectives et spécifications du cahier de charges imposent de prendre en considération dès la phase de conception, la contrainte de la consommation énergétique d'un système surtout pour les systèmes mécatroniques. Ce contexte n'est certainement pas nouveau, il a été abordé initialement en 1970 sur les applications de conception optimale de réseaux énergétiques (**Dietz,2004**) et en génie mécatronique au début de l'année 1980.

L'objectif de la démarche de conception d'un système sûr de fonctionnement est, quant à lui, de déterminer l'ensemble des capteurs et actionneurs qui répondent aux exigences et aux critères de performances du concepteur (multicritère : qualité de commande *QoC*, niveau de tolérance aux pannes *NTP*, fiabilité, à moindre coût). L'architecture du système doit lui permettre de continuer de remplir certaines missions ou services malgré la panne d'un nombre déterminé de ses instruments (composants) et malgré différentes perturbations (par exemple : erreur de modèle ou perturbation environnementale). Ainsi, pour qu'un tel système soit sûr de fonctionnement, il doit d'une part, détecter les défaillances qui peuvent survenir et, d'autre part, adapter sa commande en conséquence.

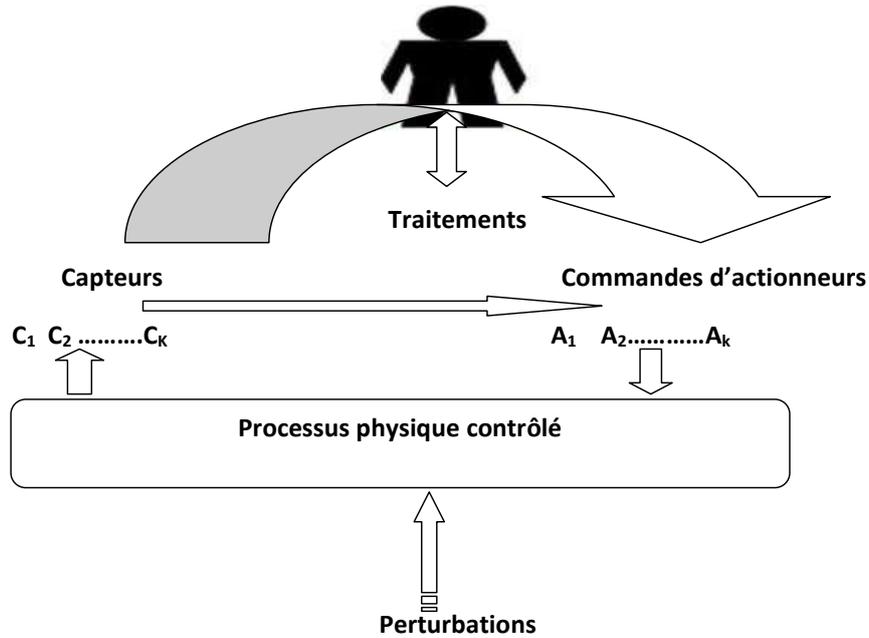


FIGURE. 1.1 – Le principe général d'un système C–C

1.2 Généralités et définitions d'un système C–C

Dans un premier temps, nous allons présenter la définition du système de contrôle–commande et différentes techniques ou stratégies de contrôle–commande utilisées dans la littérature.

1.2.1 Définition d'un système contrôle–commande

Le contrôle–commande d'un processus industriel (ensemble des capteurs, actionneurs, unité de calculs, ..) est un ensemble d'équipements permettant de contrôler l'état du procédé et de traiter automatiquement ses grandeurs physiques avec ou sans l'intervention de l'être humain. En fonction de l'objectif à atteindre, le contrôle–commande agit sur le processus en commandant des actionneurs.

Nous présentons sur la figure 1.1 le principe général d'un système de contrôle–commande pour un procédé industriel.

1.2.2 Techniques de contrôle–commande

Le contrôle des systèmes automatisés progresse constamment. Au début, le principe de la loi de commande appliquée pour le contrôle des systèmes automatisés, était de type tout–ou–rien (*TOR*) et contrôlait l'état du système et la commande en fonction de l'erreur entre la valeur désirée (la consigne) et la valeur mesurée sachant que la réponse du système contrôlé par le contrôleur (*TOR*) est caractérisée par des oscillations de la grandeur physique contrôlée (**Morosan,2011**).

Puis, pour les systèmes automatisés à temps continus, d'autres contrôleurs ont été utilisés. Les contrôleurs : proportionnel (*P*), intégrateur (*I*), dérivateur (*D*) et

leurs composés PI, PD, PID permettent de changer le comportement du système : le temps de réponse, la rapidité, la stabilité. Ces techniques ont été étudiées avec le développement du numérique pour avoir des contrôles— commandes plus robustes.

De même, en temps discret la loi de commande PID sert à améliorer les performances de contrôle et le réglage des paramètres des gains : K_p, K_I et K_D .

Récemment, des travaux de recherche s'intéressent aux techniques de contrôle—commande intelligentes construites par des approches d'intelligence artificielle : la logique floue, les algorithmes génétiques, les mécanismes d'apprentissage (**Morosan,2011**). Ces nouvelles techniques de contrôle résident principalement sur une base de connaissance du comportement du système (exprimé par des règles verbales floues, base de données des paramètres).

1.3 Système sûr de fonctionnement

Le contexte général de la sûreté de fonctionnement des processus industriels devient un apport essentiel dans les techniques de conception d'un système C—C. Tout en optimisant les coûts durant la démarche de conception, les aspects fiabilité, sécurité des systèmes automatisés mais également ceux de maintenance sont considérés en fonction de la maîtrise des risques, de l'analyse des défaillances sur le matériel à concevoir et des perturbations liées aux opérateurs et à l'environnement.

Les travaux de cette thèse porteront sur la conception d'un système de contrôle—commande sûr de fonctionnement, Dans un premier temps nous définirons ce qu'est un procédé industriel ainsi que les différents modes de fonctionnement qui influent sur l'évaluation de la sûreté de fonctionnement du système à concevoir.

Un procédé industriel est un ensemble composé de plusieurs éléments qui peuvent interagir entre eux ou avec l'environnement extérieur, il possède des missions à effectuer : la commande et le contrôle d'une grandeur physique, d'une fabrication, d'une production. En général, la démarche de conception prend en compte les modes de fonctionnement du système à concevoir ; ceux-ci dépendent des missions fixées au procédé industriel, nous classons les modes de fonctionnement de la façon suivante (**Carpentier,99**).

- Modes de fonctionnement normaux : ces modes permettent d'obtenir l'adéquation avec les objectifs de la mission fixée par le concepteur, lorsque cette mission est accomplie.
- Modes de fonctionnement anormaux : la mission n'est que partiellement ou pas du tout remplie, le service est insatisfaisant voire critique, ces modes peuvent correspondre aux modes suivants :
 - modes défaillants : mauvais fonctionnement du système à concevoir.
 - modes dégradés : la mission est partiellement remplie ou est remplie avec des moindres performances.
 - modes critiques : les caractéristiques de fonctionnement sont généralement non désirées.
 - modes interdits : le système ne doit pas fonctionner à cause des raisons de sécurité globale du système étudié.

- Modes de fonctionnement d'exception : nous distinguons deux types :
 - modes tolérés : dans ce cas, le système peut accomplir sa mission.
 - modes évolutifs : ils sont des modes transitoires permettant de passer d'un mode de fonctionnement à un autre.

1.3.1 La sûreté de fonctionnement

Un système sûr de fonctionnement est un système conçu pour réaliser des missions sans incident ou accident mettant en jeu la sécurité. Elle consiste à indiquer l'aptitude d'un système à accomplir les missions pour lesquelles il a été conçu et vise à évaluer les risques qui mettent en cause la sécurité et la fiabilité du système à concevoir.

1.3.2 Les caractéristiques de la sûreté de fonctionnement

Nous considérons d'une manière formelle les quatre caractéristiques de la sûreté de fonctionnement, la disponibilité, la fiabilité, la maintenabilité et la sécurité (**Villemeur,1988**), (**Afnor,1991**) à travers le concept de l'événement redouté (**Conrard,2007**). Par exemple, des événements "incapacité d'accomplir sa mission, " arrêt " ou " comportement dangereux " sont liés à ces caractéristiques de sûreté de fonctionnement.

Un système fiable permet d'exécuter la fonction pour laquelle il a été conçu en toute sécurité. La figure 1.2 montre que les quatre aspects de la sûreté de fonctionnement ne sont pas indépendants (**Sourisse,1997**). En effet, la conception d'un système fiable signifie de trouver la meilleure combinaison de la disponibilité, fiabilité, sécurité, maintenabilité.

Définissons ces notions (**Villemeur,1988**) :

Fiabilité : capacité d'une entité à réaliser une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné $[0, t[$.

$$R(t) = \text{Probabilité } \{ \text{Le système n'a pas de défaillance sur } [0, t] \} .$$

Disponibilité : capacité d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à un instant donné $[0, t[$; en supposant que les ressources externes requises sont fournies. C'est une caractéristique de l'installation et la conception de l'équipement de système C-C complexe.

$$A(t) = \text{Probabilité } \{ \text{le système n'a pas défaillance à temps } \in [0, t] \}$$

Maintenabilité : la capacité d'une entité à être réparée dans un temps donné dans l'intervalle $[0, t[$, et revenir dans un état dans lequel il peut réaliser la fonction souhaitée.

$$M(t) = \text{Probabilité } \{ \text{le système à être réparé au temps } \in [0, t] \}$$

Sécurité : capacité à éviter les événements critiques ou catastrophiques.

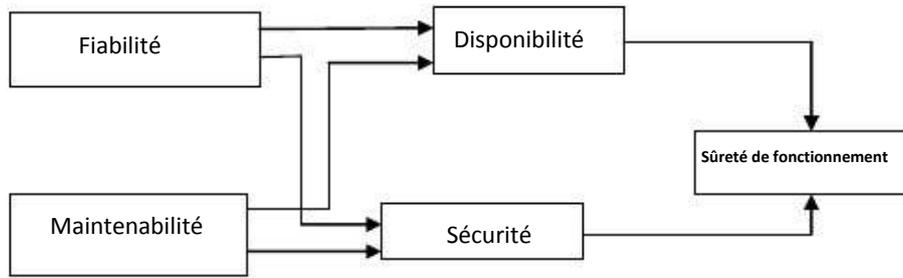


FIGURE. 1.2 – Dépendance entre les quatre caractéristiques de sûreté de fonctionnement

$$S(t) = \text{Probabilité} \{ \text{le système sans défaillance catastrophique dans } [0, t] \}$$

Pour ce travail de thèse, on évalue le critère de fiabilité en utilisant les liens structurels du système et des équations algébriques.

1.4 Formulation du problème de conception du système

Les systèmes industriels se caractérisent par le résultat d'une combinaison de sous-systèmes de différentes technologies. Le cycle en V a d'abord été utilisé comme modèle de développement en positionnant les différentes phases de développement qui commencent par la phase de la spécification et de développement jusqu'à la validation de produit comme illustré dans la figure 1.3 (Mihalache,2007). On s'intéresse dans ce modèle de conception tout d'abord à l'analyse des besoins et des spécifications, puis à la définition de l'architecture du système et l'analyse des risques. Le concepteur évalue les caractéristiques (coût, qualité de commande, qualité de performance, fiabilité, tolérance aux fautes), puis détermine les points faibles et les améliorations possibles et enfin réitère ce cycle jusqu'à aboutir à une solution acceptable vis-à-vis de différents critères techniques et économiques (Meguetta,2013 a).

Dans les travaux de thèse de (Mihalache,2007), le modèle du cycle en V a été présenté par un axe horizontal en fonction du temps et par un axe vertical selon le niveau d'intégration du système à concevoir. Le développement commence par le bloc de construction du système étudié, la partie descendante de ce modèle, où le système est graduellement décomposé en divers sous systèmes et modules jusqu'au niveau composant. La partie montante du cycle en V comprend le bloc de vérification et validation (V et V) du système où les instruments une fois réalisés sont intégrés dans des sous systèmes graduellement plus grands, jusqu'à ce que le système complet soit construit.

Le cycle en V est devenu un standard de l'industrie logicielle depuis les années quatre-vingts. Aussi, depuis l'apparition de l'ingénierie des systèmes, le modèle en V devient un outil général conceptuel pour plusieurs spécialités de l'ingénierie industrielles (Bayart,1995), (Mechraoui,2010).

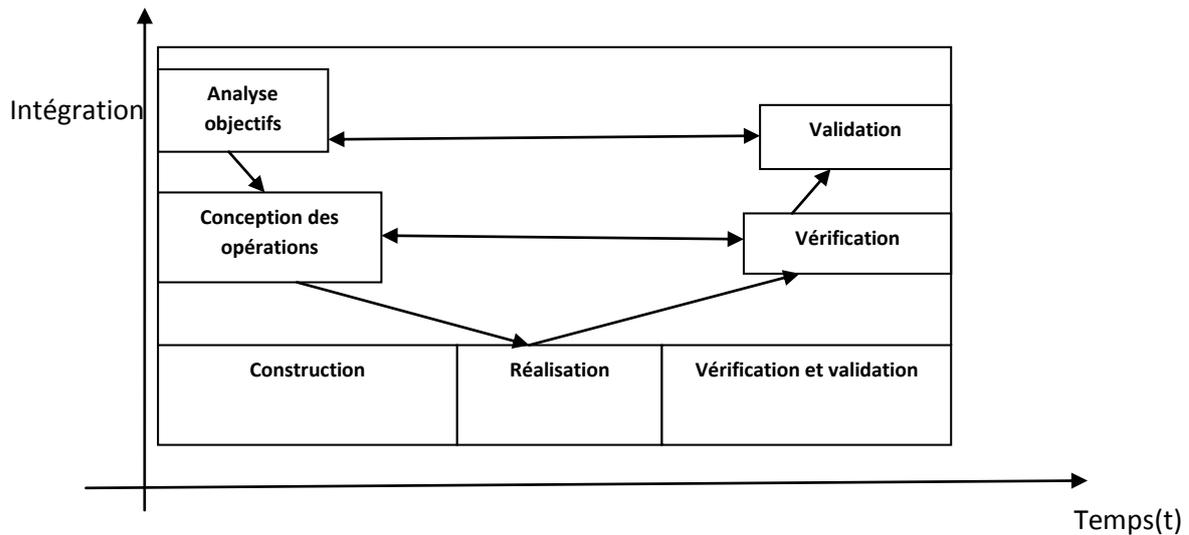


FIGURE. 1.3 – Le cycle en V

Le cycle en V se compose par les phases suivantes :

1.4.1 Outil classique de conception : le cycle en V

- **Analyse et spécification :** Cette phase consiste à déterminer l'analyse des besoins et des spécifications du système. Elle consiste à définir les fonctionnalités souhaitées pour ce système, ses interfaces, les contraintes : encombrement, autonomie, coût, technologies et la fiabilité souhaitée. Elle se scinde généralement en deux développements parallèles : celui de la partie opérative, ou de la partie mécanique, et celui de la partie commande. Elle conduit à une architecture fonctionnelle.
- **Conception :**

La conception définit une répartition des fonctions et des sous systèmes et la détermination des architectures admissibles pour le système. Cette étape est fondamentale dans le cycle de développement, il convient de vérifier que les architectures proposées respectent bien les exigences du cahier des charges.

Elle a un impact économique : coût de la réalisation, coût de développement, coût de la maintenance, et un impact sur la qualité en termes de performances. A partir des composants et technologies disponibles, cette étape va permettre la sélection de l'instrumentation, des éléments nécessaires à la réalisation du système physique, et la définition des architectures correspondantes. Elle peut donner lieu également à des réalisations spécifiques de sous-systèmes non disponibles sur étagère.

Sur les architectures matérielles, il convient de vérifier certaines spécifications du cahier des charges. D'autres spécifications seront vérifiées sur les architectures opérationnelles, résultats de la projection de l'architecture fonctionnelle

sur l'architecture opérationnelle. Sur l'ensemble des architectures répondant aux choix, l'étape de conception conduit : au choix de la solution qui sera implémentée ; c'est au niveau de cette étape de conception que se situe le travail de cette thèse.

- **Réalisation** : Cette étape conduit à la réalisation de l'architecture retenue, avec la réalisation de sous systèmes et l'assemblage progressif, avec en parallèle la réalisation des modules de commande et leur interprétation.
- **Vérification** : Cette phase de développement vise à tester les produits et les composants fabriqués par rapport aux spécifications de la conception, à ce stade, il reste certaines spécifications (exemples le temps de réponse, la synchronisation) qui ne peuvent pas être vérifiées auparavant.
- **Validation** : Finalement, cette phase consiste à la validation finale du système en constatant les critères de fonctionnalité par rapport aux besoins et spécifications du cahier des charges.

A cette étape, on obtient un système pour lequel on vérifie qu'il possède les fonctionnalités que l'on souhaitait, et qu'il répond aux critères et contraintes définis lors de la phase de conception. Si ce n'est pas le cas, on apporte les corrections nécessaires.

Dans notre cas, nous nous intéressons à l'instrumentation d'un système existant, pour lequel nous concevons l'architecture de contrôle– commande(C–C).

A partir d'une première solution potentielle d'architecture, le concepteur évalue ses caractéristiques, puis en détermine les points faibles et les améliorations possibles et enfin réitère ce cycle jusqu'à aboutir à une solution acceptable vis-à-vis de différents critères techniques et économiques. Afin d'éviter ce bouclage qui n'assure pas d'avoir envisagé toutes les solutions possibles et dont le nombre inconnu de cycles nécessaires ne facilite pas la gestion d'un projet, une démarche linéaire est proposée. Elle consiste à fournir une description du processus à instrumenter dont toutes les architectures possibles d'un système de contrôle–commande pourront être indirectement déduites puis comparées pour, en final, présenter au concepteur les meilleures vis-à-vis des critères et des contraintes imposées (Conrard,2003)(Conrard,2008).

Cette démarche de conception revient à la recherche des différentes façons d'obtenir les grandeurs requises à partir de la modélisation structurelle, à construire le problème d'optimisation intégrant la spécification des niveaux de sûreté et le critère de coût financier et résoudre ce problème pour obtenir des architectures potentiellement utilisables répondant aux spécifications (Conrard,2011) (Conrard,2009 a) (Conrard,2009 b).

Alors, pour récapituler, notre méthodologie de conception dans la figure 1.4 qui contient les points importants suivants :

- Un ensemble d'instruments disponibles (capteurs, actionneurs) classés selon

leur fonction et leur spécification.

- Les critères de performance technique—économique, impliquant les coûts, la sûreté de fonctionnement, la qualité de commande, la tolérance aux pannes.

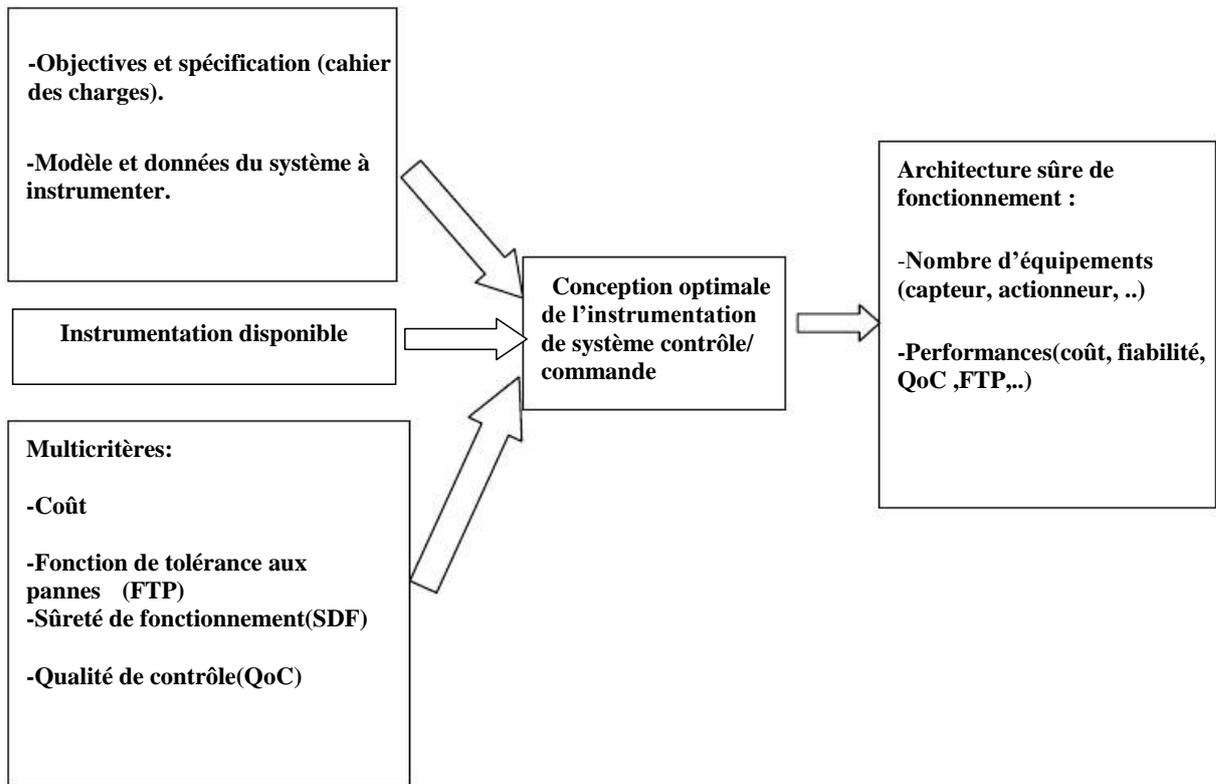


FIGURE. 1.4 – La démarche générale de la méthodologie de conception proposée

1.4.2 Conception d'un système

De nombreux travaux existent dans la littérature sur le développement de méthodes de conception pour la sécurité et le respect de l'aspect de l'environnement. La prise en compte de l'impact environnemental s'inscrit dans l'innovation technologique (Mechraoui,2009)(Dietz,2004).

Dans la référence (Chevalier,1999) présente la méthode d'analyse du cycle de vie *ACV* qui combine des critères technico— économiques : les limites du système à concevoir, la quantité et la qualité des données du système étudié, les critères physiques à retenir, la définition des caractéristiques temporelles de chaque aspect physique, le choix de méthodes de modélisation (analytique, qualitative,..).

Nous trouvons, dans les références (Stefanis,1995) (Stefanis,1997) une autre approche qui regroupe les principes de la méthode d'analyse du cycle de vie *ACV* avec le problème de l'optimisation de processus physique ; ce dernier est connu sous le nom de minimal impact environnemental *IEM*. Dans notre thèse, nous présentons notre approche de méthodologie de conception d'un système embarqué, cette méthode implique la définition d'une frontière autour du système à concevoir (pour une

mission désirée par le concepteur), la quantification d'un impact environnemental en terme de fiabilité pour effectuer la mission souhaitée par le concepteur malgré les perturbations environnementales à travers l'inclusion de plusieurs critères physiques dans les outils de conception et d'optimisation du processus étudié.

L'intérêt du travail de cette thèse consiste en la prise en compte des critères durant la phase de la conception de système de contrôle–commande en suivant une démarche d'optimisation multicritère. Ceci implique l'inclusion des spécifications et des besoins à la méthodologie de conception comme contraintes d'optimisation globale. Il s'agit d'une voie intéressante par rapport à l'approche consistant à déterminer séparément les conditions optimales pour chaque mission à accomplir.

Le problème de conception multicritères pour les systèmes C–C sûrs de fonctionnement se transpose de la façon suivante : il s'agit de déterminer le nombre et la taille des équipements (nombre des capteurs et actionneurs) ainsi que les conditions opératoires de chaque mission fixée par le concepteur. Or, (**Dietz,2004**) propose une méthodologie de conception pour les produits pharmaceutiques à base des données des recettes d'élaboration et les besoins de la production désirée selon les fonctions multi objectifs : un critère économique, critère sur l'impact environnemental et la sécurité ou la flexibilité.

La confidentialité entoure généralement les secteurs de la conception des systèmes contrôle– commande sûrs de fonctionnement. Il importe, une fois la voie de synthèse retenue pour fabriquer des composants, de développer rapidement le transfert au stade industriel.

Notre contribution pour la conception optimale de l'architecture est de définir l'ensemble admissible de l'instrumentation d'un système C–C, en sélectionnant le moindre coût et la bonne qualité de critère de performance retenue pour chaque mission fixée par le concepteur (contrôle, commande, estimation...), enfin nous obtiendrons la meilleure architecture de système à concevoir (nombre d'unités en parallèle pour chaque mission et nombres et types des capteurs et actionneurs).

D'après l'apport résultant de ces travaux autour de ce thème de recherche, il est important de présenter les différents types de modélisations utilisées en conception dans la littérature. Ces dernières ont servi au développement de notre contribution de la méthodologie de conception d'un système de contrôle– commande sûr de fonctionnement.

1.5 Modélisation utilisée dans la méthodologie de conception proposée

La méthodologie générale de conception de système contrôle– commande présentée précédemment est une phase très importante pour le concepteur. Elle nécessite une démarche de modélisation. Ici nous remarquons que nous pouvons modéliser le système à concevoir, avec peu d'informations (mode, modèle analytique, spécifica-

tion, ..) grâce à l'analyse structurelle.

L'approche structurelle appartient à la famille des méthodes qualitatives de modélisation en utilisant un modèle dynamique, statique, à base des relations d'un système qui peut être linéaire, non linéaire.

La motivation du choix de l'approche de l'analyse structurelle est que cette analyse utilise une connaissance partielle du système, elle n'utilise que les liens structurels d'existence entre les contraintes et les variables et elle ne prend pas en compte les forme particulières des contraintes du modèle, de cette façon elle peut donc être appliquée dès les phases initiales de la démarche de conception du système C-C.

1.6 Définition des critères des performances à retenir dans l'approche de conception proposée

Un des intérêts de la méthodologie de conception d'un système contrôle—commande réside sur la prise en compte des critères techniques—économiques dès le stade de la conception. Les deux principaux aspects considérés sont, d'une part, économiques relatifs au coût d'investissement c'est à dire le critère du coût total de chaque capteur et actionneur et de l'unité de traitement implantés dans l'ensemble d'instrumentation pour le système à concevoir et, d'autre part techniques : qualité de commande QoC , la sûreté de fonctionnement SDF en terme de fiabilité, de niveau de tolérance aux pannes NTP .

Finalement, la méthodologie vise à trouver la meilleure architecture composée de différents instruments (capteurs, actionneurs,..) basée sur l'optimisation de ces critères.

Nous présenterons les critères retenus dans l'approche de méthodologie de conception proposée dans ce travail de thèse.

1.6.1 Critère du coût

Le critère du coût d'un système contrôle—commande peut être défini comme étant le coût total de l'instrumentation : capteurs, actionneurs nécessaires dans la phase de conception. Le coût des capteurs et des actionneurs doivent non seulement tenir compte de leur prix d'achat mais aussi de leurs coûts d'amortissement, de leur maintenance (chaque capteur et actionneur ont une certaine fiabilité et doivent être remplacés et vérifiés périodiquement). C'est pour cela que l'on applique à chaque capteur et actionneur un coût total qui prend en compte toutes ces dépenses.

Ce critère du coût a été introduit sous la forme de la relation suivante :

$$\sum_1^K C_{qi} = C_{total} \quad (1.1)$$

Pour $i = 1 : K$, avec K est le nombre total des capteurs et / ou actionneurs implantés dans l'ensemble d'instrumentation, C_{qi} est le coût individuel de chaque capteur et/ou actionneur implanté dans l'ensemble d'instrumentation, C_{total} est le coût total de l'ensemble d'instrumentation.

L'objectif est bien entendu de trouver l'ensemble d'instrumentations le moins cher parmi plusieurs solutions obtenues dans la phase de conception, pour cela on peut utiliser la programmation linéaire ou non linéaire ou une procédure de décision multicritère.

1.6.2 Critère de la qualité de commande QoC

Le critère de QoC est jugé comme la robustesse aux incertitudes des mesures des instruments et aux perturbations. Elle est considérée comme la somme de toutes les perturbations trouvées dans l'architecture admissible choisie afin de garantir un bon accomplissement de la mission visée par le concepteur selon les spécifications du cahier des charges (Incertitude de confiance attendue).

La valeur de la grandeur physique à date future peut être quantifiée grâce aux informations précédentes obtenues aux dates successives d'échantillonnage grâce à la recherche dans l'outil de l'arbre graphique.

La méthodologie de conception en utilisant ce critère vise à trouver une meilleure architecture d'instrumentation qui garantit une bonne QoC en dépit des perturbations.

1.6.3 Critère du niveau de tolérance aux pannes

Le critère du niveau de tolérance aux pannes NTP est important parce que cet aspect rajoute, à notre méthodologie de conception, la sécurité au niveau de la phase de conception. L'évaluation du niveau de tolérance aux pannes se quantifie grâce à une fonction nommée $NTP(q)$ (**Conrard,2011**) qui exprime la capacité du système à réaliser l'estimation de la grandeur physique, concernant la mission visée par le concepteur, en présence de défaillance ou panne d'un composant et évalue ainsi le niveau de tolérance aux pannes en fonction de l'instrumentation du système (**Meguetta,2013 b**). Le système sera d'autant plus tolérant aux pannes s'il existe plusieurs possibilités d'estimer la grandeur physique à commander.

1.6.4 Sûreté de fonctionnement : Critère de fiabilité

La démarche de la conception est devenue indispensable dans l'industrie afin d'améliorer la productivité pour répondre aux besoins du concepteur en fonction de multi critères : conception d'architecture de système plus sûr, plus économique, meilleure qualité de contrôle, augmentations de performances afin de trouver la meilleure architecture d'instrumentation. De plus, pour des raisons de fiabilité et de sûreté, de qualité de contrôle et tolérance aux pannes, il est nécessaire d'étudier la conception du système contrôle— commande sous critère d'optimisation multi critère en s'appuyant sur l'outil de modélisation structurelle du système.

Pour améliorer la fiabilité, on a parfois recours à une redondance matérielle des capteurs et des actionneurs. Actuellement, les contraintes économiques conduisent à diminuer les coûts de l'instrumentation, et celui de la maintenance. La problématique de conception revient donc à trouver l'architecture optimale d'instrumentation,

répondant aux besoins du contrôle– commande et respectant les contraintes de fiabilité et de sûreté.

Dans notre approche, nous avons choisi d'utiliser la modélisation structurelle pour concevoir une architecture sûre de fonctionnement d'un système de contrôle–commande.

Ici, on s'intéresse en particulier à évaluer la fiabilité dans la démarche de conception, plusieurs architectures d'instrumentation sont étudiées. Pour chacune d'entre elles, il est possible de calculer la fiabilité à partir de la fiabilité de chacun des composants, grâce aux liens structurels du système de C–C.

1.6.5 L'énoncé de problème d'optimisation

La démarche générale choisie pour le problème d'optimisation est obtenue à partir du choix de critère retenu dans l'étape de conception.

1.6.5.1 La démarche d'optimisation

L'optimisation multicritère consiste à trouver le vecteur x (**Dietz,2004**), tel que :

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (1.2)$$

Ce vecteur satisfait les m contraintes inégalité et les p contraintes égalités suivante :

$$g_j(x_i) \geq 0, j = 1, 2, \dots, m, i = 1, \dots, n \quad (1.3)$$

$$h_k(x_i) = 0, k = 1, 2, \dots, p, i = 1, \dots, n \quad (1.4)$$

L'optimisation de ce vecteur de fonction (**Dietz,2004**) est :

$$f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)] \quad (1.5)$$

1.6.5.2 Spécification des contraintes et critères retenus

Soit A_j une architecture donnée, A_j est composé de K composants, avec $j = 1, 2, \dots, m$ où m est le nombre d'architectures possibles. On a :

$$A_j = \{q_1, q_2, \dots, q_{k_j}\}$$

$$A = \{A_1, \dots, A_m\}$$

Le problème d'optimisation est obtenu en intégrant les aspects techniques– économiques. Le critère principal est : le coût d'investissement C_{qi} , les contraintes sont : la qualité de commande QoC , le niveau de tolérance aux pannes NTP , la fiabilité $R_{mission}(t)$. La procédure d'optimisation vise à minimiser le coût global du système, c'est-à-dire la somme des coûts individuels des k_j composants employés (noté C_{A_j}).

$$\begin{cases} \text{Min}(CA_j) \\ QoC(q_i) \leq n_{i1} \\ NTP(q_i) \geq n_{i2} \\ R_{mission}(t) \geq R_{désirée} \end{cases} \quad (1.6)$$

Avec $CA_j = \sum_1^{k_j} Cq_i$, n_{i1} représente l'incertitude de confiance, n_{i2} le seuil de niveau de tolérance aux pannes et $R_{désirée}$ est la valeur de la fiabilité souhaitée par le concepteur dans son cahier de charges.

Compte tenu des contraintes, l'ensemble des solutions admissibles peut être vide, pour éviter ce problème, on peut réduire le nombre de contraintes.

1.6.5.3 Procédure de décision multicritères : choix de la meilleure architecture d'instrumentation

La procédure de décision multicritère est utilisée dans les travaux de recherche de cette thèse, afin de choisir la meilleure architecture d'ensemble d'instrumentation sûr de fonctionnement d'un système contrôle– commande.

L'objectif de cette démarche de décision multicritère est de choisir une seule architecture d'un système contrôle– commande obtenant parmi plusieurs solutions des algorithmes de recherches : la meilleure au sens des deux critères introduit à savoir le coût et l'un des ce critères de performances (qualité de commande, tolérance aux pannes, fiabilité).

On travaillera donc dans un cas de résolution bi critère.

1.7 Approches de résolution des problèmes d'optimisation

1.7.1 Travaux récents relatifs au problème d'optimisation multicritère

En comparant les approches traditionnelles et itératives de la résolution du problème d'optimisation, les méthodes Métaheuristiques font un peu des hypothèses à la résolution du problème d'optimisation. Usuellement, elles peuvent trouver des bonnes solutions par rapport aux autres efforts des approches de calcul (**Kirkpatrick,1983**), (**Tang,2011**). Le succès des algorithmes métaheuristiques est lié à leurs capacités de donner l'équilibre entre l'exploration (diversification) et l'exploitation (intensification).

Selon ces stratégies de recherches, les métaheuristiques peuvent être classées en deux catégories : la première qui donne une seule solution basée sur un algorithme de recherche local qui contient le recuit simulé (Simulated Annealing (*SA*)) et l'algorithme de la recherche tabou (tabu search (*TS*)). La deuxième catégorie concerne la population basée sur les algorithmes de recherche grâce à l'apprentissage de leurs éléments par exemple : L'optimisation par essais particuliers (Particle Swarm Optimization (*PSO*)) (**Chan,2011**), l'algorithme immunitaire (Immune Algorithm

(IA)) (Tang,2011).

Généralement, les algorithmes méta heuristiques fournissant une seule solution, montrent une forte capacité de recherche locale. Bien que, les autres algorithmes métaheuristiques basés, sur la population prouvent une forte capacité de recherche globale.

Dans la référence (Javed,2009), Javed présente une formulation du problème d'optimisation qui minimise le retard de transmission entre la source et la paire de destination.

Dans les travaux de (Gao,2014), Gao présente un nouvel algorithme de Particle Swarm Optimization *PSO*. Cet algorithme consiste à mettre en valeur la capacité d'exploration et vise aussi à maintenir rapidement les valeurs de convergence. Alors, la combinaison entre les mérites de l'algorithme (Tabu Algorithm *TSAB*) et l'algorithme de *PSO*, implique un algorithme d'optimisation hybride (Hybrid Optimization Algorithm (*IPSO – TSAB*)) qui utilise l'algorithme de *TSAB* pour identifier la recherche dans un espace déterminé par la procédure de l'algorithme de *IPSO*.

Le travail cité dans cette référence (Park,2014) s'intéresse au problème d'étude d'optimisation pour le système de contrôle en réseau (Network Control System *NCS*). Ici, il propose un algorithme robuste de sélection des multiples chemins pour la satisfaction du retard souhaité par l'exploitation de divers multi chemins (exploiting multipath diversity) pour un système contrôlé en réseau *NCS*. Cette méthode est considérée en différentes études du problème de multi chemin de routage (multipath routing problems), son intérêt est d'atteindre un système robuste vis à vis des incertitudes des paramètres de mesures.

1.7.2 Méthodes classiques de résolution multicritère du problème d'optimisation

Nous présenterons dans cette section, les principaux algorithmes d'optimisation multicritères. On peut répertorier ces algorithmes en deux grandes familles : d'un côté, ceux qui nécessitent, au préalable, une formulation (critères et contraintes) et des propriétés mathématiques telle que : la dérivabilité pour les variables continues (Steuer,1989), du problème à résoudre, et d'un autre côté les algorithmes déterministes, les algorithmes purs qui s'appuient sur des règles d'évolution probabilistes (Sherali,1982). Ces dernières méthodes ne requièrent la vérification d'aucune formulation et propriété mathématique particulière, elles sont stochastiques (Dietz,2004).

1.7.2.1 Méthodes déterministes

Au niveau de la conception multicritères, les démarches les plus utilisées dans la littérature sont des procédures de type mixed integer non linear optimization *MINLP*. En effet, la formulation générale du problème fait apparaître des critères et contraintes généralement non linéaires, comportant des variables entières et des

variables réelles.

Dans certaines applications particulières, le problème peut être linéaire ou linéarisé ; il est alors résolu au moyen de procédures Mixed Integer Linear Programming *MILP* ou " Branch and Bound " (**Charon,1996**).

Lorsque les solutions du problème sont limitées (jusqu'à une centaine de solutions), on peut résoudre le problème d'optimisation de façon exacte en utilisant les moyens informatiques actuels.

La recherche de la meilleure solution peut être effectuée avec un algorithme de type "Branch and Bound" (**Roucairol,1998**). Il existe différentes techniques pour améliorer la rapidité de l'algorithme (étude d'alternatives par ordre de coût croissant, décomposition du problème si des groupes de variables sont indépendants).

Lorsque ces systèmes sont de taille plus importante, on ne peut plus utiliser ces algorithmes, et on fait appel à des algorithmes d'optimisation stochastiques tel que l'algorithme génétique.

Les limites de cet algorithme sont qu'il fournit un résultat, dont on ne peut assurer qu'il s'agit de la solution optimale, sauf dans certains cas pour lesquels des propriétés mathématiques sont vérifiées (**Dietz,2004**).

Il existe différents algorithmes stochastiques par exemple : la technique du recuit simulé (*RS*), les algorithmes génétiques (*AG*), les algorithmes de colonies de fourmis.

1.7.2.2 Méthode de Recuit Simulé

L'algorithme de Simulated Annealing (*SA*) proposé initialement par Metropolis (**Metropolis,1983**) et Kirkpatrick (**Kirkpatrick,1983**) est inspiré d'un processus dans le génie énergétique. Il repose sur une analogie entre un problème d'optimisation et un problème de physique statistique. Il a été utilisé afin de minimiser l'énergie du matériau (**Dietz,2004**)(**Chan,2011**).

La méthode constate qu'une démarche de l'algorithme de recuit simulé "*refroidit*" une solution à un problème donné en minimisant son état énergétique (le critère retenu d'optimisation). Néanmoins, cet algorithme est basé sur le meilleur choix de ses paramètres obtenus par technique empirique (**Floquet,1994**).

1.7.2.3 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques font partie de la classe des algorithmes évolutionnistes, leur objectif principal est d'avoir une solution finale approchée à un problème d'optimisation (**Tang,2011**). Ces algorithmes consistent à trouver une combinaison entre la problématique physique abordée et le problème d'optimisation, ils utilisent la notion de sélection naturelle et l'appliquent à une population de solutions potentielles au problème abordé.

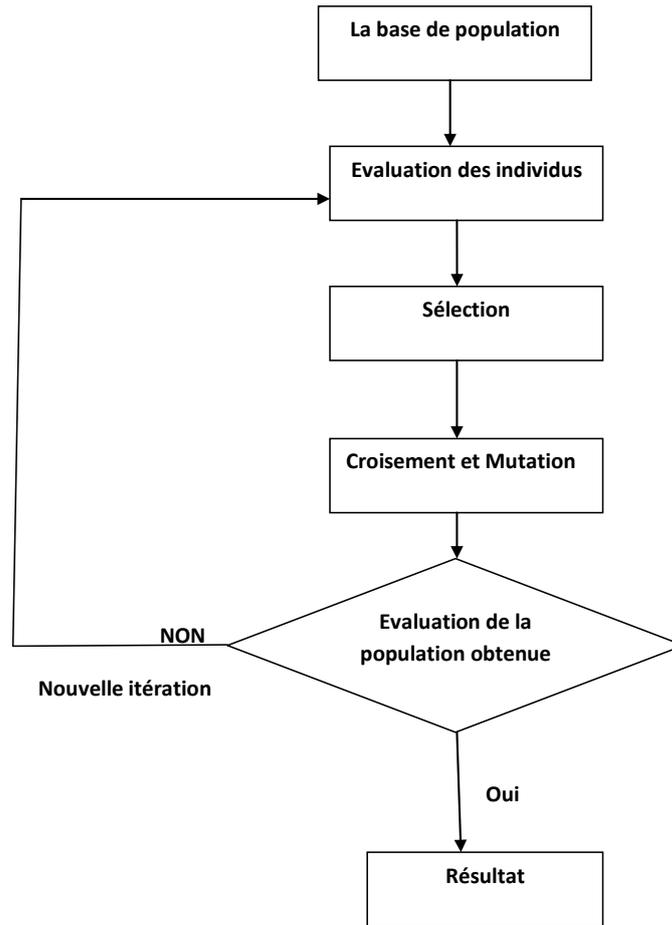


FIGURE. 1.5 – Les étapes de l’algorithme génétique

Holland (**Holland,1975**) et Goldberg (**Goldberg,1989**) présentent un grand nombre d’intérêts au développement des algorithmes génétiques, leur procédure vise à évoluer les individus par croisement, mutation et sélection selon le critère à optimiser retenu, jusqu’à avoir une population d’individus très bien adaptés au milieu naturel (une population de bonnes solutions pour le problème abordé).

Ces algorithmes génétiques prouvent leur robustesse et leur efficacité pour traiter des problèmes d’optimisations multi objectives pour la conception des systèmes complexes (**Bernal,1999**).

L’organigramme dans la figure 1.5 explique les étapes principales de l’algorithme génétique : en commençant par la population de base générée aléatoirement, ensuite l’étape de l’évaluation, avec un caractère correspond à un chromosome, après l’étape de la sélection qui consiste à trier en fonction de son adaptation au problème abordé avec la possibilité de l’optimisation, finalement, l’étape de croisement et mutation où chaque couple donne deux chaînes filles pour lequel il faut choisir la mutation.

1.7.2.4 Algorithme de colonies de fourmis

Ces algorithmes sont inspirés du comportement des fourmis, ils font partie de la classe méta heuristiques d'optimisation. Ils sont aussi fondés sur l'intelligence collective. Initialement proposées par Colorni (**Colorni,1991**) qui a expliqué une analogie avec le comportement naturel d'une colonie d'insectes, la démarche de l'optimisation s'apparente à des fourmis recherchant un chemin entre leur colonie et une source de nourriture (la solution au problème abordé).

Ces algorithmes s'appuient, comme les algorithmes génétiques, sur une population d'individus; à la base cet algorithme a été utilisé pour résoudre le problème d'optimisation du voyageur de commerce et des problèmes d'optimisation combinatoire. La recherche se fait selon les deux étapes suivantes :

- Etape 1 : les meilleures fourmis choisissent leur trajet et tracent une piste de phéromone.
- Etape 2 : les autres fourmis effectuent une recherche générale en suivant les phéromones déposées précédemment, en retenant les traces les plus performantes sachant que l'évaporation fait disparaître les mauvaises solutions.

1.7.3 Méthodes d'optimisation multicritère

Le concepteur veut toujours prendre en compte multi critères de performances dans la démarche de conception, afin d'avoir la meilleure solution de son problème d'optimisation. Il existe dans la littérature plusieurs grandes approches de la résolution du problème d'optimisation multicritères.

L'économiste Vilfredo Pareto a trouvé à la fin du dix– neuvième siècle une formulation standard sur la recherche de l'optimisation multicritère (**Pareto,1896**). Il considère un point particulier $x^* \in F$ est Pareto optimal, avec $x \in F$ l'espace de solutions faisables.

L'interprétation de Vilfredo Pareto montre que x est Pareto optimal dans le cas où il n'existe aucun vecteur faisable x . Dans la section suivante, nous présenterons deux méthodes souvent appliquées pour rendre le problème multicritère à monocritère, afin de faciliter la résolution du problème d'optimisation pour la conception des systèmes complexes.

1.7.3.1 Méthode de ϵ –contraintes

La méthode ϵ –contraintes réside à reformuler le problème d'optimisation multicritères à une optimisation monocritère en s'appuyant sur l'un des critères retenus par le concepteur (le plus fort critère selon le concepteur), les autres critères étant considérés comme des contraintes du problème. Cette méthode a été utilisée dans plusieurs projets de recherche (optimisation multi objectives de réseau d'eau où chaque réseau est basé sur la technique de ϵ –contraintes, par exemple).

Le travail de thèse de (**Dietz,2004**), explique que cette méthode vise à trouver le minimum de la r –ème fonction. Cette procédure est répétée autant de fois que nécessaire en changeant les valeurs des scalaires ϵ_i jusqu'à avoir une solution satisfaisante.

Tel que :

$$f_r(x) = \text{Min} f_r(x) \quad (1.7)$$

Où $f_i(x)$ sont les contraintes additionnelles au problème d'optimisation, pour $i = 1, 2, \dots, k$ et $i \neq r$:

$$f_i(x) \leq \epsilon_i \quad (1.8)$$

Pour récapituler cette approche ; elle fait partie de la famille d'optimisation combinatoire multi-objectifs. Son principe de résolution se fait par le déplacement des contraintes sur les critères, par exemple : nous optimisons sur le premier critère tout en ajustant sur la contrainte relative du deuxième critère, jusqu'à la fin de la méthode. Elle minimise le critère $f_r(x)$ par une valeur ϵ_i . Nous recommandons de lire l'ouvrage de Collette et Siarry (**Collette,2002**), pour plus d'information sur les méthodes d'optimisation multicritères.

1.7.3.2 Méthode de pondération

La méthode de pondération consiste à rendre un problème multicritère en un problème monocritère qui représente la somme pondérée de tous les critères (**Sherali,1982**) (**Dietz,2004**).

Alors, le problème réside à trouver (**Steuer,1989**) :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^k \lambda_i f_i(x) \quad (1.9)$$

Où λ_i est un poids relatif pour chaque critère du problème d'optimisation proposé, avec $\lambda_i > 0$.

Pour que chaque fonction soit de même ordre de grandeur, nous écrivons en général l'équation précédente sous la forme suivante :

$$\text{min} \sum_{i=1}^k \lambda_i f_i(x) / f_i^0 \quad (1.10)$$

Où f_i^0 est l'optimum global de la fonction f_i (**Dietz,2004**). La limite de cette méthode est le choix de l'importance de pondération relative des critères.

Dans le cadre des travaux de cette thèse, nous résolvons le problème d'optimisation multicritère par la mise en priorité (méthode de priorité (**Sherali,1982**)) sur l'un des critères pris en compte dans la méthodologie de conception d'un système de C-C, c'est à dite, nous mettons l'accent forte sur les critères techniques plutôt que économiques.

1.8 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter la méthodologie de conception optimale multicritère d'un système contrôle-commande. Le cycle en V en tant qu'outil de mo-

délisation a été présenté, puis différentes méthodes de résolution multicritères ont été détaillées.

L'étude de cette approche de conception a été ciblée à l'aide de plusieurs critères de performances : techniques physique- économique, leurs interactions au sein du système à concevoir seront analysées dans les chapitres suivants.

Chapitre 2

Modélisation structurelle

2.1 Introduction

La conception d'un système contrôle– commande (C–C) nécessite une démarche de modélisation. Dans ce chapitre, nous allons présenter l'analyse structurelle que nous utilisons dans notre approche de conception du système C–C. La modélisation structurelle, a été largement utilisée pour modéliser les systèmes complexes à partir de la seule connaissance de l'existence de contraintes entre variables sans que les valeurs des paramètres soient nécessairement connues (**Cocquempot,2004**), (**Blanke,2003**), (**Staroswiechi,2002**). Cette modélisation est effectuée lors de la phase de conception. Elle est utilisée pour déterminer le nombre et la place des instruments à implanter afin de respecter le cahier des charges de la mission visée par le concepteur.

2.2 Système physique

Un système physique est constitué d'un ensemble de composants, d'équipements et d'éléments de traitement qui interagissent entre eux afin de réaliser la(les) fonction(s) pour laquelle (lesquelles) le système est conçu. Il peut être modélisé par un ensemble de variables et de relations établissant des liens entre les variables.

2.2.1 Les variables

En science exacte, le terme variable désigne un paramètre physique dont on souhaite étudier l'évolution dynamique selon l'état des autres paramètres physiques. Ces variables tentent d'apporter une solution notamment au problème de modélisation du système physique à étudier. Nous distinguons différents types des variables :

- Variable connue (mesurée) : variable pour laquelle on dispose de mesures fournies par les instruments implantés dans la phase de conception. Pour ce type de variables, nous trouvons par exemple : consignes, commandes, mesures..
- Variable inconnue : variable des entrées et sorties du système physique étudié non mesurée, ou variable interne de la représentation d'état du système ou encore perturbation..
- Variable estimable : variable qui peut être estimée d'en moins une façon, que ce soit par mesure directe par capteur ou par d'autres variables, soit déduite à partir des relations décrivant le système étudié.

- Variable redondante : variable obtenue par la redondance matérielle (capteurs, actionneurs, instruments, ..) c’est à dire dont on a plusieurs mesures.

Dans la figure suivante extraite de la thèse de (**Carpentier,99**), nous trouvons un autre type de variable qui s’appelle : variable observable qui résume la combinaison des notions de redondance, mesure (connues), d’estimation et la possibilité de passage entre eux.

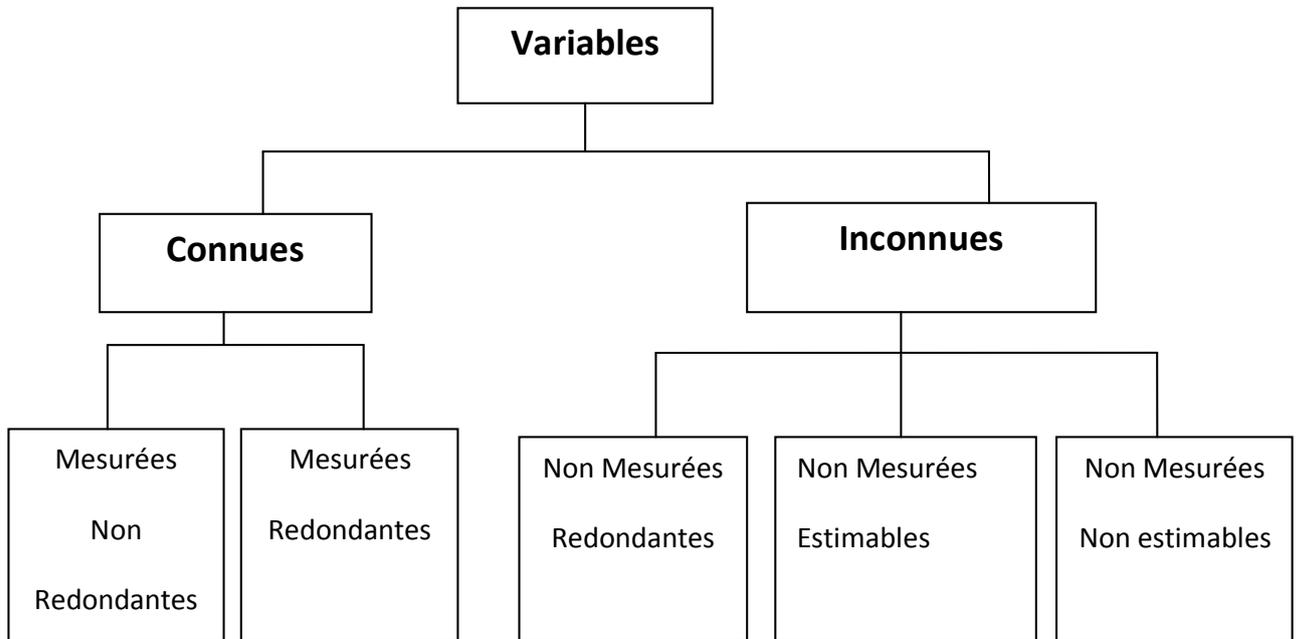


FIGURE. 2.1 – Les variables

2.2.2 Les relations

Pour une meilleure compréhension de l’avancement de la science dans tous les domaines, la formulation des expressions qui montrent les liens entre la matière, l’énergie, le mouvement, et les forces, dans le langage mathématique, implique la notion d’une relation qui donne la vision des formules entre les variables du système physique étudié. Du point de vue expérimental, les relations se traduisent par l’existence des variations sachant que le fonctionnement de n’importe quel système physique peut être décrit par un ensemble d’équations dynamiques et algébriques, linéaires ou non linéaires, qui définissent—contraignent— la trajectoire temporelle d’un ensemble de variables (**Cocquempot,2004**).

2.2.3 Les différentes représentations d’un modèle physique

L’approche structurelle appartient à la famille des méthodes qualitatives de modélisation en utilisant un modèle du comportement du processus. Les modèles de comportement du système peuvent avoir différentes représentations. Ils peuvent être linéaires, non linéaires, dynamiques, statiques, qualitatifs, à base des règles d’expertise,... (**Belkherchi,2011**).

La motivation du choix de l'approche de l'analyse structurelle est que cette méthodologie utilise une connaissance pauvre du système tout en prenant compte des liens d'existence entre les relations et les variables. De cette façon elle peut être appliquée dès les phases initiales de la démarche de conception du système C-C.

Le modèle structurel du système peut être représenté par trois types différents : comportemental, fonctionnel, topologique.

2.2.3.1 La représentation comportementale

Le comportement global d'un système se déduit de sa topologie et du comportement de chaque composant. Le modèle de comportement de chaque composant exprime les contraintes qu'imposent ce composant aux variables de description qui lui sont liées. On peut ainsi associer à chaque composant un ensemble de relations dont l'expression dépend du type de connaissance dont on dispose sur l'activité du composant à modéliser, les modes et les états du système sont également pris en compte. Ces contraintes peuvent être analytiques (statiques ou dynamiques) ou qualitatives. Dans notre cas d'étude, on ne garde du modèle de comportement que les informations sur l'existence de relations entre les variables. L'intérêt de l'approche structurelle est ainsi de dégager les liens structurels du système. Ceux-ci serviront de guide pour une mise en oeuvre plus complète utilisant le modèle de comportement.

2.2.3.2 La représentation fonctionnelle

Il existe plusieurs méthodes d'analyse fonctionnelle qui permettent de réaliser une décomposition du système. Ces méthodes visent à la représentation du système par niveaux hiérarchiques dont le niveau supérieur matérialise l'activité globale du système et dont les niveaux inférieurs représentent les activités élémentaires (**Carpentier,1999**).

Cette méthode permet d'analyser une problématique. En construisant un modèle, du contexte donné, on exprime différents points de vue sur la compréhension complète du système complexe en séparant les aspects fonctionnels des aspects matériels comme illustré dans la figure 2.2.

Cet analyse est descendante, structurée, hiérarchique et sert à modéliser à la fois les objets (données) et les activités en utilisant une représentation graphique qui permet de montrer les modules, leur relation et leur intégration dans une structure hiérarchique¹.

2.2.3.3 La représentation topologique

La modélisation topologique consiste à décrire les liens matériels entre les différents supports ou éléments.

Ces liens caractérisent des transferts de matière, d'énergie ou d'information entre les composants du système. La topologie du système correspond donc à l'architec-

1. <http://cours.esial.uhp-nancy.fr/>

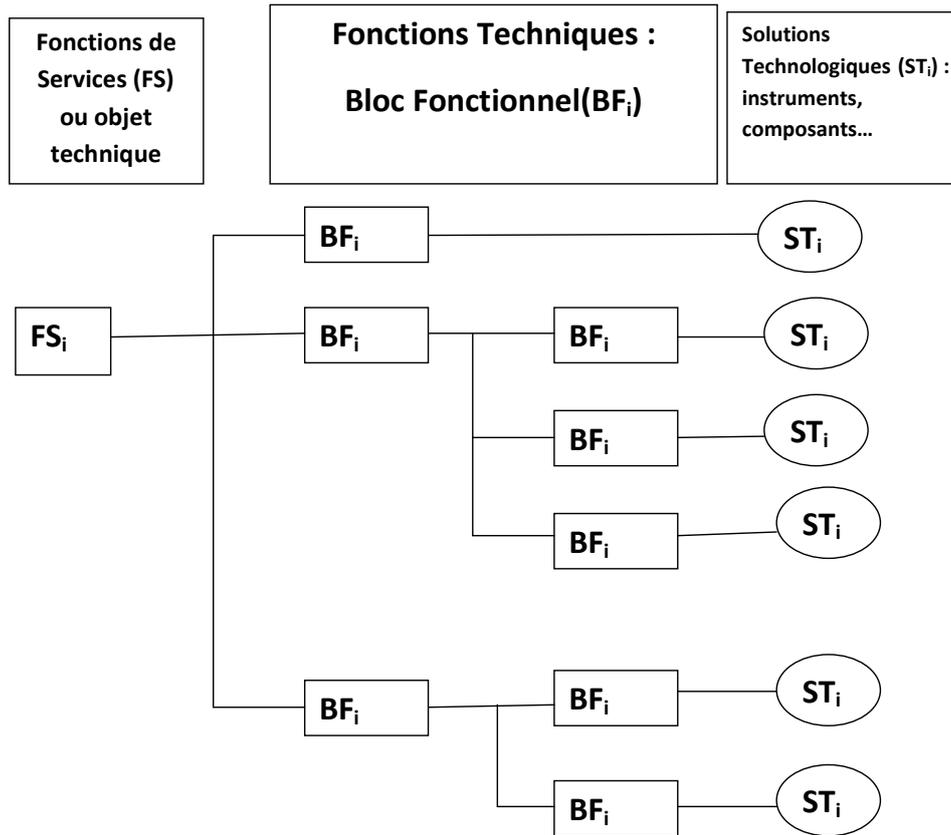


FIGURE. 2.2 – Exemple de décomposition par l’analyse fonctionnelle

ture du système et décrit les liens entre les composants élémentaires du système². Ces liens peuvent être représentés sous la forme d’un réseau de connexions.

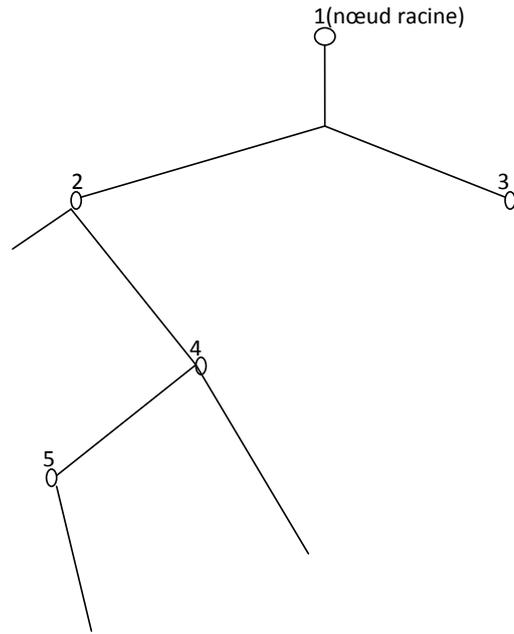
La décomposition des fonctions du système étudié s’effectue selon le traitement successif de tous les noeuds internes contenus dans l’arbre représenté par des liaisons et des noeuds comme dans la figure 2.3.

2.2.4 L’approche structurelle

L’approche structurelle est recommandée pour la modélisation des très grands systèmes et permet, par exemple, de connaître les conditions structurelles d’observabilité ou de commandabilité, les possibilités de détection et de localisation des défaillances (**Krysander,2002**) ou d’étudier la reconfigurabilité du système en cas de perte de composants (**Asokan,2007**).

Cette approche peut se réaliser tôt dans la démarche de conception et consiste à déterminer le nombre et les places des capteurs et actionneurs à implanter dans le système à concevoir tout en respectant les exigences du cahier des charges et en utilisant les propriétés structurelles du système étudié.

2. [http://www.gregstanleyandassociates.com/Reconciliation Rectification ProcessData-1976.pdf](http://www.gregstanleyandassociates.com/Reconciliation%20Rectification%20ProcessData-1976.pdf)



2, 3, 4, 5 : sont les nœuds connectés au nœud racine

FIGURE. 2.3 – Le principe général de la modélisation topologique

Un des avantages de l'utilisation de cet outil est de pouvoir déterminer des algorithmes d'estimation et de reconfiguration. Ainsi, il peut proposer le type et la localisation des capteurs à implémenter (sensor location problem) (**Dustegor,2004**). La décomposition de Dulmage Mendelsohn (**Dumont,2006**) est alors utilisée.

Pour conclure, l'analyse structurelle est un outil puissant qui permet de déterminer de nombreuses propriétés du système considéré et elle est applicable malgré une connaissance imprécise du système.

2.2.5 Les différentes représentations graphiques par l'approche structurelle

Nous rappelons différentes modélisations structurelles à base de la théorie des graphes. L'objectif de cette partie n'est pas de rentrer en détail dans la théorie des graphes, mais de montrer que la théorie des graphes est la base de l'analyse structurelle de système car elle permet d'obtenir une représentation graphique simple et efficace pour dégager les propriétés structurelles de systèmes complexes.

2.2.5.1 Modélisation structurelle par un graphe biparti

Le graphe biparti est largement utilisé dans le contexte structurel pour la détection de faute (Fault Detection and Isolation *FDI*) ou pour des applications de supervision (**Staroswiecki,2000**). Dans certains travaux, il est appliqué pour le problème de sélection des capteurs (**Conrard,2009**), la tolérance aux fautes *FTC* et la reconfiguration du système, (**Blanke,2006**), (**Blanke,2003**), (**Frisk,2003**).

La modélisation structurelle permet aussi d'étudier l'observabilité et la commandabilité et les possibilités de détection et localisation des défauts (**Simon,2014**), (**Boukhobza,2011**). Cette analyse est effectuée lors de la phase de conception pour le problème de placement des capteurs.

La modélisation structurelle permet de représenter les liens entre les différentes variables (dont les grandeurs physiques) d'un processus contrôlé. Ces liens correspondent aux relations qui contraignent l'évolution des variables. Le modèle structurel peut se représenter sous la forme d'un graphe biparti relations–variables ou bien par une matrice d'incidence. Il se définit alors par la relation suivante, où F représente l'ensemble des relations et Z l'ensemble des variables :

$$S : \{F\} \times \{Z\} \rightarrow \{0, 1, -1\}$$

- $S(f_i, z_j) = 1$ si la variable z_j est utilisée dans la relation f_i et peut être déterminée à partir de la connaissance des autres variables impliquées,
- $S(f_i, z_j) = -1$ si la variable z_j est utilisée dans la relation f_i mais par la nature non inversible de cette relation, cette variable ne peut pas être déterminée à partir de la connaissance des autres variables impliquées,
- $S(f_i, z_j) = 0$ dans le cas où la variable n'intervient pas dans la relation considérée.

Dans cette modélisation représentée par une matrice d'incidence, chaque ligne est associée à une relation et chaque colonne à une variable. La position (i, j) indique si la variable j apparaît dans la relation i . Dans le graphe biparti, ce lien (variable, relation) est représenté par un arc reliant la contrainte f_i et la variable z_j . Les représentations par le graphe biparti et par la matrice d'incidence sont illustrées sur l'exemple ci-dessous.

2.2.5.2 Exemple illustratif sur la représentation par graphe biparti et matrice d'incidence

Considérons le système comprenant deux variables d'état x_1, x_2 , deux sorties mesurées y_1, y_2 , un signal de commande u , défini par les équations suivantes :

$$f_1 : x_1 = x_2 + u, \text{ soit } f_1(x_1, x_2, u) = 0 \quad (2.1)$$

$$f_2 : y_2 = x_2, \text{ soit } f_2(y_2, x_2) = 0 \quad (2.2)$$

$$f_3 : y_1 = x_1, \text{ soit } f_3(y_1, x_1) = 0 \quad (2.3)$$

La représentation du système par la matrice d'incidence est donnée par la table 2.1.

TABLE. 2.1 – matrice d'incidence

	x_1	x_2	u	y_1	y_2
f_1	1	1	1		
f_2		1			1
f_3	1			1	

Le graphe biparti du système est schématisé par la figure 2.4

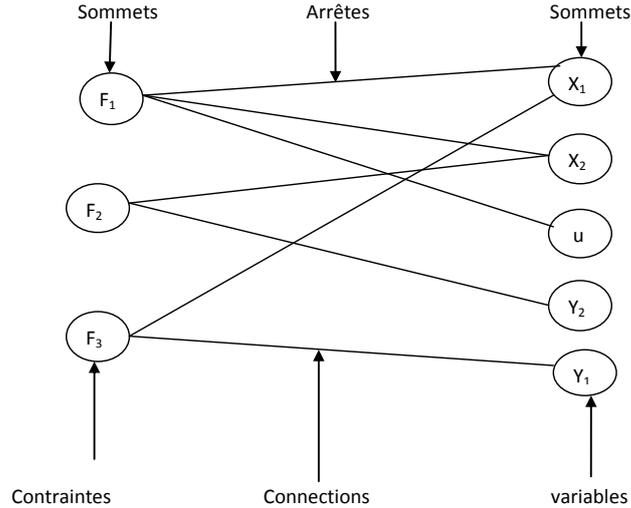


FIGURE. 2.4 – Représentation du système par un graphe biparti

2.2.5.3 Représentation graphique par bond graph

Dans le contexte structurel, il existe également l’approche Bond–graph (**Sueur,1991**) qui donne plusieurs outils de spécification à l’analyse structurelle, des applications dans le domaine de diagnostic des fautes sont trouvées dans la littérature (**Tagina,1996**).

Bond–Graph est un outil graphique explicite pour capturer la structure commune de l’énergie des systèmes (**Dilek,2005**) . En 1959, le professeur Henry Martyn Paynter a donné l’idée de systèmes décrivant en termes d’obligations de puissance, reliant les éléments du système physique aux structures dites jonction des contraintes (**Paynter,1961**). Cet échange de puissance d’un système est appelé liaison– graphique. Dans cette approche, un système physique est modélisé par des symboles et des lignes.

La figure 2.5 représente un exemple basique de système de deux masses (m_1, m_2) et un ressort de raideur K . Le Bond Graph correspondant représente graphiquement le transfert de l’énergie du système étudié en modélisant ses paramètres locaux. $P_i = e_i f_i, i = 1, 2, 3$ est la puissance avec e_i est l’effort mécanique, f_i est le flux (**Ould Bouamama,2003**), (**Tagina,1996**).

De cette représentation, on peut obtenir les relations entre les différentes variables, et donc un modèle structurel.

2.2.5.4 Modélisation structurelle par digraph

Le modèle de comportement d’un système est une paire (C, Z) où $Z = z_1, z_2, \dots, z_n$ est un ensemble de variables et de paramètres, et $C = C_1, C_2, \dots, C_m$ est un ensemble des contraintes. Selon le type des variables (quantitative, qualitative, floue) et de temps (continu, discret), les contraintes peuvent être exprimées sous différentes formes : algébriques et équations différentielles, équations aux différences, règles.

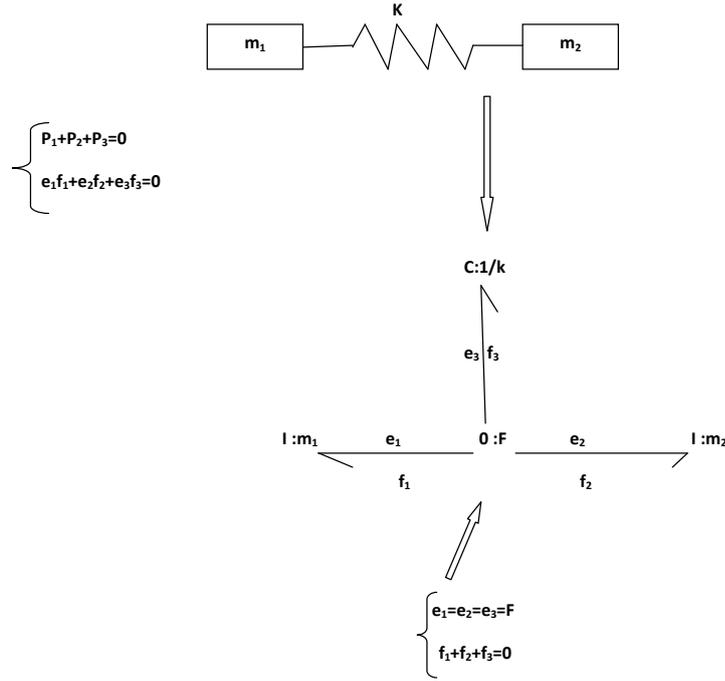


FIGURE. 2.5 – Représentation du système par Bond Graph

Considérons, par exemple, les modèles de l'espace d'état comme dans (**Dilek,2005**) :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), \theta) \quad (2.4)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t), \theta) \quad (2.5)$$

Où $x(t) \in R^n$ est le modèle d'état, $u(t) \in R^m$ et $y(t) \in R^p$ sont respectivement les entrées et les sorties du système, et $\theta \in R^q$ est vecteur de perturbation.

La distinction entre les vecteurs et les ensembles de composants est claire, d'après le contexte, aussi aucune notation particulière ne sera introduite pour les distinguer. Ainsi, dans les équations, les ensembles de variables et les contraintes sont les suivantes :

$$Z = x \cup u \cup y \cup \theta \quad (2.6)$$

$$C = f \cup g \quad (2.7)$$

Où f représente l'ensemble des contraintes différentielles :

$$\dot{x}_i(t) - f_i(x(t), u(t), \theta) = 0, i = 1, \dots, n \quad (2.8)$$

Et g représente les contraintes liées aux mesures

$$y_j(t) - g_j(x(t), u(t), \theta), j = 1, \dots, p \quad (2.9)$$

Les variables peuvent être considérés comme des variables connues soit issues des capteurs, soit fournies aux actionneurs sous la forme d'ordre, ou des variables inconnues qui sont les grandeurs physiques du processus. L'ensemble des variables est alors $Z = x \cup u \cup y \cup \theta$, et l'ensemble des contraintes correspond aux équations

différentielles $C = f \cup g$.

Une difficulté concerne l'opérateur de dérivation utilisé dans ce modèle pour décrire le comportement du système. La section suivante s'intéresse à sa prise en compte dans une modélisation structurelle.

Dans cette thèse, on considère que la variable et sa dérivée comme des variables différentes dans la contrainte différentielle, pour le cas d'un système C–C à temps discret (ça sera expliqué dans le chapitre de l'exemple d'application). Nous présentons dans la section suivante la modélisation des variables dynamiques des systèmes dans le cas d'une représentation sous la forme d'un digraph.

2.2.5.5 Modélisation des variables dynamiques et des dérivées

Il y a trois façons de représenter des variables dynamiques évoluées en termes de temps :

- l'extension du modèle structurel en ajoutant des nouvelles équations obtenues grâce à la traduction de l'opérateur différentiel (comme notre cas d'étude : exemple d'application d'un système discret), de ce fait là, il va apparaître des nouvelles variables au modèle structurel original du système étudié (**Staroswiecki,2000**)
- Considérer x et \dot{x} comme des variables distinctes reliées par l'intermédiaire de la contrainte différentielle, ce qui implique la distinction structurelle du modèle (**Krysander,2002**).
- La variable x et sa dérivée \dot{x} sont considérées structurellement comme les mêmes.

Afin d'illustrer ces différentes modélisations, on utilisera l'exemple suivant défini par deux équations :

$$f_1 : \dot{x}_1 = x_2 + u \quad (2.10)$$

$$f_2 : y = x_1 \quad (2.11)$$

2.2.5.6 Transposition du modèle structurel du continu à l'échantillonné

Dans cette approche, on fait une transformation du modèle structurel à variables continues vers un modèle échantillonné. Pour cet exemple, en utilisant le développement numérique de Taylor de premier ordre, nous remplaçons les contraintes de la façon suivante :

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = \frac{x_1(t) - x_1(t - \delta t)}{\delta t} \quad (2.12)$$

Dans ce cas, il y a de nouvelles variables ajoutées au modèle structurel. Les équations de l'exemple correspondantes au nouveau système sont :

$$f_1 : x_1(t) = x_1(t - \delta t) + \delta t(x_2 + u) \quad (2.13)$$

$$f_2 : y = x_1(t) \quad (2.14)$$

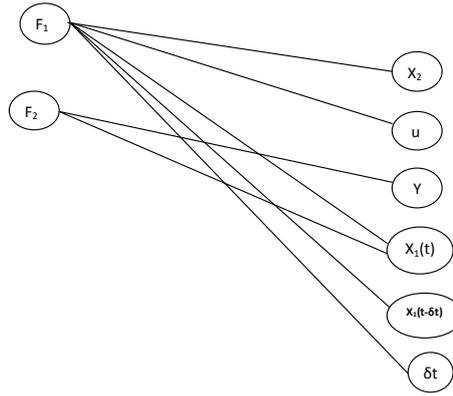


FIGURE. 2.6 – Graphe biparti pour la transposition du modèle structurel

Le système échantillonné est représenté par le graphe biparti de la figure 2.6.

La représentation par la matrice d'incidence est illustrée dans la table 2.2.

TABLE. 2.2 – Matrice d'incidence

	$x_1(t)$	$x_1(t - \delta t)$	δt	x_2	u	y
f_1	1	1	1	1	1	
f_2	1					1

2.2.5.7 Distinction structurelle

Dans cette méthode, on introduit une différenciation structurelle entre x_1 et \dot{x}_1 . Sur l'exemple, le graphe biparti correspondant est celui de la figure 2.7. Il intègre une nouvelle contrainte $f_3(x_1, \frac{dx_1(t)}{dt}) = 0$ qui exprime la relation entre la variable x_1 et sa dérivée.

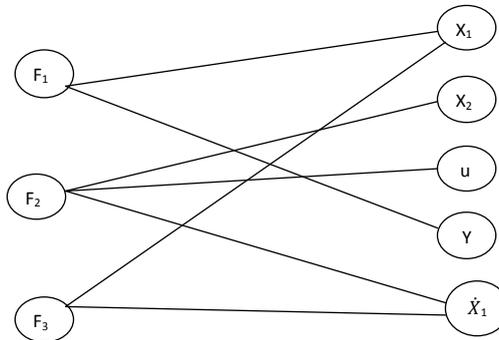


FIGURE. 2.7 – Graphe biparti pour la distinction structurelle

La représentation par la matrice d'incidence est illustrée dans la table 2.3.

TABLE. 2.3 – Matrice d'incidence

	x_1	\dot{x}_1	x_2	u	y
f_1		1	1	1	
f_2	1				1
f_3	1	-1			

2.2.5.8 Les variables et leurs dérivées représentées par les mêmes variables :

Pour cet exemple, si on considère x_1 et \dot{x}_1 structurellement comme une seule variable c'est-à-dire $x_1 \equiv \dot{x}_1$, le graphe biparti du système résultant est le suivant :

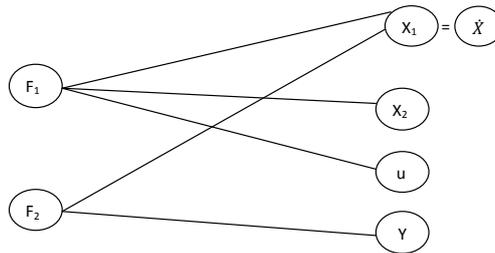


FIGURE. 2.8 – Graphe biparti pour x_1 et \dot{x}_1 structurellement identiques

La représentation par la matrice d'incidence est illustrée dans la table suivante :

TABLE. 2.4 – Matrice d'incidence

	x_1	x_2	u	y
f_1	1	1	1	
f_2	1			1

2.3 Les outils de la théorie des graphes

2.3.1 La recherche des chemins structurels

Un des intérêts de la modélisation structurelle est de pouvoir établir de façon exhaustive, les différents ensembles de mesures (grandeurs connues) et les contraintes associées, qui permettent d'estimer chaque grandeur inconnue.

2.3.1.1 Les outils algorithmiques de recherche dans les arbres

Le développement de la science concernant la théorie des graphes sert à résoudre de nombreux problèmes et applications dans différents domaines (automatique, informatique industrielle, production, ..).

Définition de la liste de succession : c'est une table composée par des successeurs ou des prédécesseurs d'un sommet, sachant que chaque ligne représentée

à un sommet³. La représentation par liste de successeurs comme illustrée dans la figure 2.9 correspond au graphe élémentaire en figure 2.10.

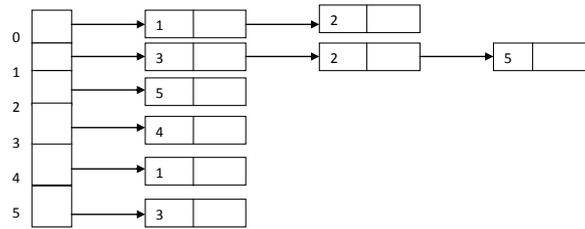


FIGURE. 2.9 – Représentation de graphe par liste des successeurs

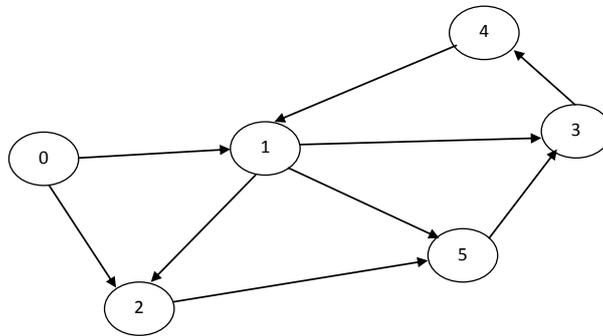


FIGURE. 2.10 – Le graphe élémentaire

2.3.2 Définition de la matrice d'incidence

Un graphe orienté⁴ sans boucle est défini par $G = (X, A)$, où X sont les sommets et A les arcs notés a_j , $M = m_{ij}$, où M est une matrice de taille $n \times m$ et m_{ij} ses paramètres.

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i \text{ est l'extrémité initiale de } a_j \\ -1 & \text{si } x_i \text{ est l'extrémité terminale de } a_j \\ 0 & \text{si } x_i \text{ n'est pas une extrémité de } a_j \end{cases} \quad (2.15)$$

Pour un graphe non orienté sans boucle

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i \text{ est une extrémité de } a_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.16)$$

Cas particulier : la matrice d'adjacence : Considérons $G = (X, A)$ comportant n sommets, la matrice d'adjacence de G est égale à la matrice μ_{ij} de dimension $n \times n$

3. <https://www.enseignement.polytechnique.fr/informatique/ARCHIVES/IF/poly/main003.html>

4. <http://cours.ensem.inpl-nancy.fr/cours-dm/graphes/Graphes.pdf>

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } (i, j) \in A \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.17)$$

A partir de la représentation de la matrice d'incidence sous forme d'arbre, la recherche de solutions pour certains problèmes s'apparente à une recherche arborescente. Ces principaux outils fonctionnent soit :

- Par parcours en profondeur (depth first search)
- Par parcours en largeur (breadth first search)
- Par parcours par approfondissements successifs (depth first iterative deepening)

2.3.3 Recherche en profondeur et en largeur

2.3.3.1 Principe général :

L'algorithme de recherche dans les graphes est un algorithme de marquage. Au départ, tous les sommets sont non marqués à l'exception du sommet de départ $u(t)$. A chaque étape, on sélectionne un sommet non marqué, adjacent à un sommet déjà non marqué. Cette sélection est différente selon s'il s'agit d'une recherche en largeur ou en profondeur.

On va expliquer ce principe dans l'algorithme suivant :

Algorithme de recherche en largeur

```

Entrée Graphe  $G(f_i, v_i)$ ; sommet initial  $u(t)$ 
%  $f_i$  : relations;  $v_i$  : variables
       $T$  : structure de données contenant  $f_i$  et  $v_i$ 
% Initialiser tous les sommets non marqués
% Marquer le sommet de départ  $u(t)$ 

       $T \leftarrow u(t)$ 

% Retirer le sommet de départ  $u(t)$  de la structure de données  $T$ 
  Tant que  $T \neq \phi$ 
%  $T$  n'est pas vide
      Examiner tous les sommets voisins dans  $T$ 

           $x \leftarrow T$ 

% Retirer le sommet  $x$  de la structure de données  $T$ 
      Pour chaque voisin de sommet  $y$  non marqué de sommet  $x$ 
          Marquer  $y$ ;

           $T \leftarrow y$ 

% Ajouter  $y$  à la structure de données  $T$ 
      Fin Pour
  Fin tant que

```

2.3.3.2 Exemple sur la recherche en profondeur et en largeur

Dans la section précédente nous avons cité l'algorithme de recherche en largeur, en suivant le même principe appliqué dans ce dernier, nous vous présentons deux exemples simples sur les deux parcours de recherche (en largeur et profondeur).

2.3.3.3 Recherche en largeur :

Les sommets sont visités depuis $u(t)$ dans l'ordre : $a_t, \alpha_t, m_t, v_{t-\delta t}, v_t, v_{t+\delta t}, I_t, cv_t, v_{desired}$

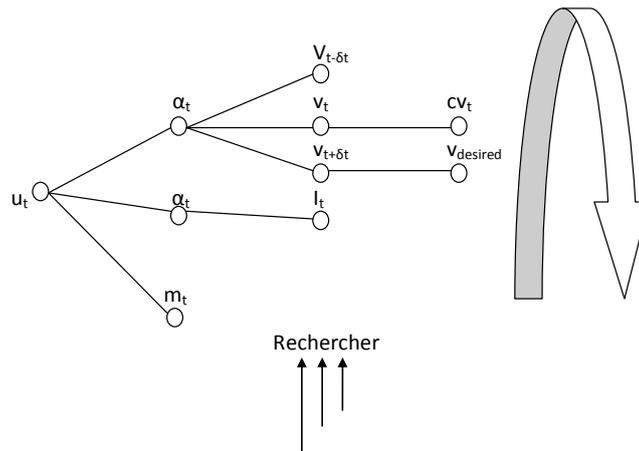


FIGURE. 2.11 – Recherche en largeur

2.3.3.4 Recherche en profondeur :

Les sommets sont visités depuis $u(t)$ dans l'ordre : $m_t, \Delta m_t, a_t, v_t, cv_t, \alpha_t$.

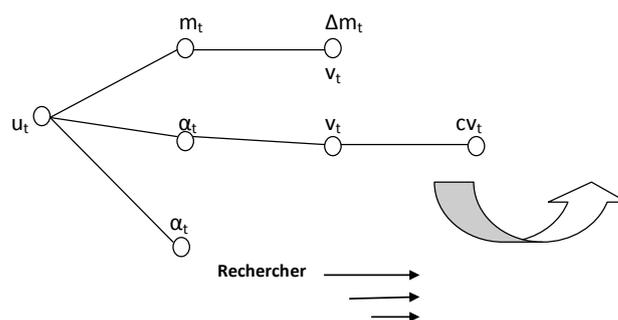


FIGURE. 2.12 – Recherche en profondeur

2.3.4 L'algorithme du plus court chemin

On peut interpréter le plus court chemin entre deux sommets i et j comme un avantage économique dans la démarche de conception du système, surtout dans l'optimisation des architectures admissibles à moindre coût pour concevoir un système

de contrôle— commande.

En effet, ce plus court chemin peut être défini comme le temps d'exécution nécessaire ou les dépenses d'installation des instruments et leurs équipements.

On considère un graphe orienté $G = (X, A)$ (relation, variable) en associant à chaque arc $a \in A$ un nombre $l(a) \in R$ où $l(a)$ est la longueur d'arc. Lorsque $a(i, j) = l_{ij}$, l_{ij} est la notation pour la longueur de l'arc a . L'algorithme du plus court chemin consiste à trouver un chemin $\mu(i, j)$ avec la longueur totale $L(\mu) = \sum_{a \in \mu(i, j)} l(a)$ soit minimum.

Nous présenterons alors l'**algorithme de Moore— Dijkstra** pour trouver le plus court chemin⁵.

Algorithme (Moore—Dijkstra)

Etape 1 Etant données $X = 1, 2, \dots, n$.

% l_{ij} est la longueur de l'arc (i, j) , $(i, j) \in A$.

% π^* est la longueur minimum des chemins des sommets $1 \rightarrow i$

$$\pi^*(1) = 0$$

Etape 2 Partition de l'ensemble des sommets en S et $\bar{S} = X \setminus S$:

% L'algorithme effectue $n - 1$ itérations.

% S est sous-ensemble composé par des sommets définitivement $\pi(i)$ marqués entre le sommet un et sommet i

% \bar{S} est sous-ensemble composé par des sommets provisoirement marqués, il est défini par :

$$\forall K \in \bar{S} : \pi(K) = \min_{i \in S \cap \Gamma_K^{-1}} (\pi(i) + l_{iK})$$

Etape 3 Sélection de j si :

% Soit j le sommet de marque provisoire $\pi(j)$ minimale

$$\pi(j) = \min_{K \in \bar{S}} (\pi(k))$$

$$\pi(j) - \pi^*(j)$$

% le sommet j inclus dans S et retiré de \bar{S} .

Faire

$$\bar{S} \leftarrow \bar{S} \setminus \{j\}$$

Si $\bar{S} = \phi$ alors Fin

% Mise à jour de l'ensemble S :

$$S \leftarrow S \cup \{j\}$$

% Les sommets marqués provisoirement : k de \bar{S} sont associés à l'arc (j, k) .

Etape 4 Faire $\forall i \in \bar{S} \cap \Gamma(j)$

5. <http://cours.ensem.inpl-nancy.fr/cours-dm/graphes/Graphes.pdf>

$$\pi(i) = \min(\pi(i), \pi(j) + l_{ji})$$

Retourner en étape 3

Ici, nous présentons des outils qui permettent de simplifier les formules structurales (**Nikolskaia,2000**), leurs buts principaux :

- Supprimer les branches inutiles (le bouclage surtout entre les arêtes).
- Préparer les formules à des réécritures plus importantes (diminuer le bouclage et le nombre des états, noeuds ..).

2.3.5 La réécriture et la simplification des formules structurales

2.3.5.1 Méthode de coalescence

Les facteurs communs sont recherchés à partir des connecteurs commutatifs et

associatifs : $\begin{cases} f_i = g_1..g_i..g_n \\ g_i = h_1..h_k \end{cases}$
 \Rightarrow donc, f va être redéfini, comme suit :

$$f = g_1..h_1..h_k..g_n$$

Ici, le but important est de factoriser les équations ou trouver des facteurs communs à l'ensemble des formules structurales en utilisant l'algorithme de facteurs communs.

2.3.5.2 Algorithme de facteurs communs

L'avantage de rechercher des facteurs communs est de réduire la dimensionnalité du nombre des opérations. Cette technique appelée "réécriture", s'applique à l'ensemble des équations algébriques contenant des opérateurs associatifs–commutatifs.

Dans (**Nikolskaia,2000**) et (**Thomas,2002**), les auteurs présentent un algorithme de recherche des facteurs communs d'une longueur minimale pour un ensemble de formules. Cet algorithme se fait en deux étapes :

- Etape 1 : Déterminer les facteurs communs d'une longueur minimale K . (C.-à-d. K le nombre des facteurs communs fixer au début de l'algorithme). L'ensemble FP des couples $\{\phi, \pi\}$ représente le résultat de cette étape, avec ϕ l'ensemble de sous formules communes d'une taille minimale K et π représente l'ensemble des formules algébriques ayant en commun les éléments ϕ .
- Etape 2 : Choisir dans l'ensemble FP des couples, un couple particulier auquel la mise à jour de facteur commun sera appliquée, en tant que FP n'est pas vide. Tout en incrémentant et décrémentant selon la taille de π .

Algorithme de facteurs communs (**Nikolskaia,2000**)

-
- 1 :Soit K la longueur maximale du facteur.
 2 :Soit FP un ensemble de couples

$$FP = \{\langle \phi, \pi \rangle\} ;$$

avec $\phi, \pi \subseteq V$

3 :Pour tout opérateur faire

$$o \in \{\vee, \wedge\}$$

4 :Calculer les ensembles P et ν

$$P = \{v \in V \mid a(x) \geq k, op(x) = 0\}$$

$$\nu = \{v \in V \mid \exists p \in P$$

Tel que $v \in C(p)$

5 :Choisir la fonction d'indexation i pour P et ν

6 :Calculer la matrice $M, |M| = |\nu| \times |P|$

$$M(m, n) = 1$$

si $i^{-1}(n) \in C(i^{-1}(m))$

$$M(m, n) = 0$$

autrement

7 :Soit $start_{row} = 1$ et $FP = \Phi$

8 :Tant que $start_{row} \prec |P|$ Faire

9 : $start_{row} = start_{row} + 1$

10 : $row = start_{row}$

11 :

$$\varphi = \{n \in N \mid M(start_{row}, n) = 1\}$$

12 : Tant que $j \succ 0$ et $|\varphi| \succ k$

13 :

$$\psi = \{n \in N \mid M(row, n) = 1\}$$

14 : $\varphi = \varphi \cap \psi$
 15 : $row = row + 1$
 16 : fin tant que
 17 :

$$\pi = \{v \in V \mid v \in \nu, i(v) \in \varphi\}$$

 18 :

$$\pi = \{v \in V \mid v \in P, \forall n \in \varphi, i^{-1}(n) \in C(v)\}$$

 19 : $FP = FP \cup \langle \phi, pi \rangle$
 20 : Fin tant que
 21 : Tant que $|FP| > 0$ Faire choisir
 22 : Si $\langle \phi, pi \rangle \in FP$
 23 : Créer $\forall v \in \phi, w \in \pi, M(i(w), i(v)) = 1$ Alors
 24 : $\dot{v} \in V$ Tel que : $op(\dot{v}) = 0, C(\dot{v}) = \phi, P(\dot{v}) = \pi$
 25 : Pour tout $e = (w, v)$ tel que $v \in \phi, w \in \pi$ Faire
 26 :

$$E = E \setminus e ;$$

$$\text{et ; } M(i(w), i(v)) = 0$$

27 : Fin pour

28 : Fin si

29 :

$$FP = FP \setminus \langle \phi, \pi \rangle$$

30 : Fin tant que

31 : Fin Pour

Nous avons présenté cet algorithme de facteur commun, pour la simplification des équations du modèle, avant l'application de l'algorithme de recherche de la commande qui sera présenté dans notre approche proposée.

2.4 Limites de l'analyse structurelle

Malgré la simplicité de l'analyse structurelle, cette méthode présente certaines limites. Par exemple, un chemin trouvé implique seulement qu'une relation puisse exister. Les relations réelles d'un comportement du système doivent être établies pour vérifier que la relation correspondante permet effectivement l'évaluation d'une variable inconnue à partir de celles connues. Dans le cas des relations non inversibles, celles-ci sont directement traitées dans la matrice d'incidence par la valeur -1 . Parfois, dans l'utilisation de cet outil dans l'aspect de la tolérance aux fautes, la valeur de la variable à estimer est trop faible en comparaison avec les autres valeurs et leur bruit de mesure. De ce fait, le concepteur doit vérifier que parmi les relations trouvées pour estimer chaque grandeur physique inconnue, il n'existe pas de relations inutilisables.

2.5 Approche proposée

Dans cette thèse, la conception du système contrôle –commande sera étudiée par l’approche structurelle. Les principales caractéristiques de la méthode proposée sont les suivantes :

- La méthode recherche, dans le modèle structurel, les chemins de grandeurs connues liées à des capteurs ou à des actionneurs, permettant d’atteindre une ou plusieurs grandeurs inconnues. Ces dernières grandeurs correspondant à l’objectif du système de contrôle-commande qui consiste soit à mesurer ces grandeurs, soit à les asservir.
- La méthode propose une représentation graphique soit pour montrer la manière d’estimer une grandeur inconnue soit pour évaluer la commande à appliquer aux actionneurs afin d’asservir une grandeur particulière.
- La méthode profite de la simplicité de la modélisation structurelle et accélère les premières phases de conception en déterminant une manière d’effectuer la commande du système.

Dans ce chapitre, nous proposons de compléter la modélisation structurelle classique (**Blanke,2003**) en ajoutant une information sur le comportement particulier du système selon le mode de celui-ci ou de l’environnement. Cette information permettra de spécifier des contraintes supplémentaires spécifiques à certains cas ou à certaines situations.

Afin de structurer la modélisation, les variables peuvent être regroupées en trois familles :

- les grandeurs physiques du processus ; ces variables sont supposées **inconnues**.
- les grandeurs **connues** soit les mesures issues des capteurs, soit les commandes fournies aux actionneurs.
- Une extension du modèle : **les modes** ou **les états** du système pour lesquels certaines relations sont considérées comme valides ou invalides.

De même, trois groupes de relations peuvent être distingués :

- celles liées aux contraintes physiques et au processus, valides quel que soit le mode de fonctionnement
- celles exprimant les liens entre les grandeurs physiques et les capacités de mesure.
- celles spécifiques à des modes de fonctionnement particulier des composants.

2.5.1 Variables connues et inconnues

Toutes les variables physiques sont considérées comme inconnues pour le système de commande. Les variables connues sont celles fournies par des capteurs ou celles transmises aux actionneurs. Le but de l’étape de conception consiste à déterminer l’instrumentation pour chaque point du processus physique où les capteurs peuvent être mis en oeuvre. A cet effet, un ensemble de contraintes correspond à l’ensemble des capteurs. Des variables supplémentaires sont également introduites et correspondent aux grandeurs connues qui sont utilisables pour le système de commande (**Conrard,2011**).

Les trois approches citées précédemment sur la modélisation des variables dynamiques et des dérivées sont des choix possibles, mais pour l’analyse structurelle

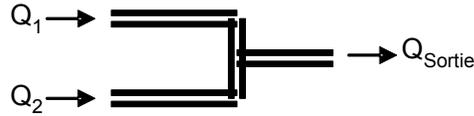


FIGURE. 2.13 – Système à 3 tuyaux

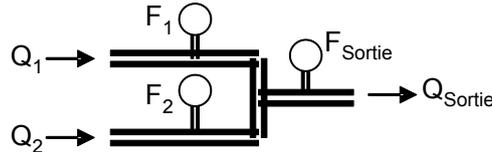


FIGURE. 2.14 – Exemple de trois tuyaux avec débitmètres

utilisée dans la thèse, nous sélectionnons la première approche (Elargissement du modèle structurel) ; c'est à dire en intégrant une contrainte entre la dérivée d'une variable et cette même variable.

On considère l'exemple d'un système constitué de trois tuyaux (conduite) comme illustré dans la figure 2.13. La matrice d'incidence (tableau 2.5) montre la relation entre les flux, et exprime que si deux flux sont connus, alors le dernier peut être évalué :

$$C_1 : Q_1 + Q_2 - Q_{Sortie} = 0$$

	Q_1	Q_2	Q_{Sortie}
C_1	1	1	1

TABLE. 2.5 – la matrice d'incidence pour trois conduites

Ainsi, cette matrice d'incidence fournit un moyen pour représenter les différentes contraintes qui relient les grandeurs physiques, à savoir, si une quantité physique peut être évaluée en fonction des autres variables. Un autre intérêt de cette modélisation est qu'elle n'a pas besoin de la mise en place exacte d'équations physiques.

On considère maintenant que des débitmètres peuvent être mis en oeuvre à trois points d'instrumentation. Trois contraintes et trois variables connues sont ainsi ajoutées au modèle structurel (Table 2.6). Une analyse graphique rapide (ou matrice d'incidence) montre que deux méthodes peuvent être utilisées pour estimer le flux de sortie (Q_{Sortie}) comme le montre la figure 2.14, soit en utilisant une mesure directe par le débitmètre F_{Sortie} ou d'utiliser la contrainte physique et les grandeurs connues F_1 et F_2 , avec les contraintes $C_2 : F_1 - Q_1 = 0$, $C_3 : F_2 - Q_2 = 0$, $C_4 : F_{Sortie} - Q_{Sortie} = 0$.

	Q_1	Q_2	Q_{Sortie}	F_1	F_2	F_{Sortie}
C_1	1	1	1			
C_2	1			1		
C_3		1			1	
C_4			1			1

TABLE. 2.6 – Matrice d’incidence pour trois tuyaux avec débitmètres

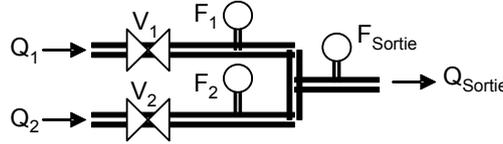


FIGURE. 2.15 – Exemple de trois tuyaux avec deux valves

2.5.2 Modes de fonctionnement

Souvent, les systèmes travaillent en plusieurs modes de fonctionnement. Chaque mode de fonctionnement correspond à un état discret qui représente une configuration donnée du système physique (par exemple une valve qui peut être ouverte ou fermée) ou l’état des actionneurs (par exemple, un circuit peut être mis en service ou non). En ce qui concerne le mode, certaines contraintes physiques doivent être prises en considération ou non. Ainsi, nous avons étendu le modèle structurel en introduisant de nouvelles variables (appelées aussi variables de mode) correspondant à l’état discret, à la description structurelle pour préciser quand une contrainte est considérée ou non. Dans le cas où la contrainte est valable quelle que soit la valeur de la variable de mode, aucune valeur de la variable de mode n’est donnée.

Par exemple, si deux vannes sont ajoutées dans l’exemple précédent, comme indiqué sur la figure 2.15, la matrice d’incidence (Table 2.7) contient deux nouvelles variables associées à chaque vanne. Deux nouvelles contraintes sont ajoutées et expriment que, si une vanne est fermée, le flux correspondant peut être déterminé.

Si une valve est fermée, l’écoulement dans la conduite correspondante est connu et égale à zéro. Si elle est ouverte, l’écoulement ne peut être déduit immédiatement. Par conséquent, pour chaque grandeur physique nécessaire pour le système de commande, le mode de fonctionnement courant peut être spécifié et permet d’identifier des nouvelles méthodes d’estimation d’une grandeur physique inconnue (Conrard,2009 b).

2.5.3 Exemple de l’estimation d’une grandeur physique par l’analyse structurelle

Grâce à la matrice d’incidence, l’ensemble exhaustif des moyens d’atteindre une grandeur physique donnée peut être déterminé. La méthode consiste à trouver tout les chemins dans la matrice d’incidence, en exprimant la variable inconnue qui doit être estimée en fonction des variables connues.

	V_1	V_2	Q_1	Q_2	Q_{Sortie}	F_1	F_2	F_{Sortie}
C_1			1	1	1			
C_2			1			1		
C_3				1			1	
C_4					1			1
C_7	<i>ouverte</i>		-1					
C_8		<i>ouverte</i>		-1				
C_9	<i>fermée</i>		1					
C_{10}		<i>fermée</i>		1				

TABLE. 2.7 – Matrice d’incidence de trois tuyaux avec deux vannes

Les chemins d’accès doivent respecter les contraintes non – inversibles c’est à dire qu’ils doivent correspondre à des séquences possibles de calculabilité. En outre, si un mode de fonctionnement particulier est spécifié, les contraintes correspondantes sont intégrées dans la recherche de chemins.

Ainsi, dans l’exemple (Fig.2.15) précédent, l’analyse de la matrice d’incidence prévoit que le débit Q_1 peut être déterminé par les différents moyens suivants :

- En utilisant directement F_1 et la relation C_2 ou indirectement en utilisant F_2 et F_{Sortie} grâce aux relations C_3 et C_4 pour l’estimation de Q_2 et Q_{Sortie} , puis en utilisant la contrainte C_1 pour en déduire Q_1 .
- Sans mesure si la vanne V_1 est fermée, puisque la valeur Q_1 est connue grâce à la contrainte C_7 ou C_9 .
- En utilisant directement F_1 ou F_{Sortie} si la vanne V_2 est fermée, puisque la valeur Q_2 est connue (contrainte C_8) et grâce à des contraintes C_1 et C_4 qui permettent de calculer Q_1 .

Par conséquent, selon le mode de fonctionnement, différents chemins pour estimer Q_1 peuvent être décrits par les relations suivantes qui expriment les variables requises (**Conrard,2011**) :

- $Q_1 \Leftarrow F_1 \vee (F_2 \wedge F_{sortie})$, quel que soit le mode de fonctionnement.
- $Q_{1/V_1\text{fermée}} \Leftarrow \emptyset$, dans le cas où la vanne V_1 est fermée.
- $Q_{1/V_2\text{fermée}} \Leftarrow F_1 \vee F_{sortie}$, dans le cas où la vanne V_2 est fermée.

2.5.4 Contraintes non–inversibles

Il y a certains cas où des variables ne peuvent être évaluées à partir des autres en raison de la nature de la contrainte qui les relie. Par exemple, il est possible (même si cela n’est pas toujours facile) d’évaluer la dérivée d’une variable à l’aide des algorithmes adaptés, mais il est impossible de calculer l’intégrale d’une variable si l’état initial est inconnu.

Le non–inversibilité d’une contrainte par rapport à une variable est indiquée en mettant -1 au lieu de 1 dans le modèle structurel. Lorsque cette valeur apparaît dans la matrice d’incidence, la variable correspondante ne peut pas être déterminée par les autres variables. Revenons sur l’exemple précédent pour illustrer comment gérer les contraintes non–inversibles. Considérons qu’un détecteur d’écoulement est

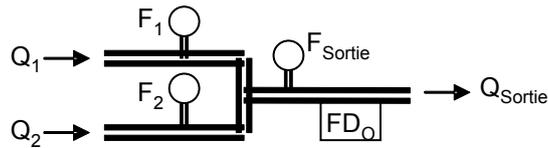


FIGURE. 2.16 – Système composé de trois tuyaux avec un détecteur de débit

ajouté au niveau du tuyau de sortie pour indiquer si un flux est présent ou pas (Fig.2.16).

La sortie du détecteur est notée FD_0 . Afin d'introduire cet élément dans la description structurelle, une variable booléenne Q_{sortie}^B est ajoutée. Cette variable est égale à 0 s'il n'y a pas d'écoulement dans le tuyau de sortie et 1 dans le cas contraire (Conrard,2011).

De la valeur de Q_{sortie} (0 ou 1), il est possible de déduire la valeur de Q_{sortie}^B . Évidemment, le contraire n'est pas vrai. Ceci est indiqué par -1 dans le modèle structurel donné (Table 2.8).

	Q_1	Q_2	Q_{Sortie}	Q_{sortie}^B	F_1	F_2	F_{Sortie}	FD_0
C_1	1	1	1					
C_2	1				1			
C_3		1				1		
C_4			1				1	
C_5			-1	1	1			
C_6				1				1

TABLE. 2.8 – Matrice d'incidence de trois tuyaux avec un détecteur de débit

2.5.5 L'analyse structurelle—système d'état discret

D'un point de vue de la fiabilité, le système de contrôle doit vérifier si le mode de fonctionnement actuel est celui requis. Ainsi, l'état de chaque variable de mode correspondant au mode de fonctionnement courant doit être vérifié.

Grâce à l'analyse structurelle, le processus consiste à trouver certains ensembles de variables connues qui permettent la vérification de l'état de chacune des variables de mode.

Plus particulièrement, si le modèle structurel comporte une contrainte avec les variables de mode dans l'état requis et une grandeur physique unique, l'estimation de cette dernière variable donne un moyen de vérifier cet état. L'utilisation de la méthode d'analyse précédente sur l'estimation d'une grandeur physique fournit l'ensemble des variables connues pour la vérification de l'état d'une variable de mode considéré.

Ainsi, dans l'exemple précédent (Fig 2.16), vérifier que la vanne V_1 est fermée (ou ouverte) est effectuée par l'estimation de la valeur de Q_1 , et par conséquent, grâce à l'ensemble des mesures suivantes :

- $(V_1 = \text{fermée}) \Leftarrow F_1 \vee (F_2 \wedge F_{Sortie})$, quel que soit le mode de fonctionnement
- $(V_1 = \text{fermée})_{/V_2} \Leftarrow F_1 \vee F_{Sortie}$, dans le cas où la vanne V_2 est fermée
- En outre, si le détecteur de débit sur la figure 2.16 est utilisé, une autre solution est trouvée si la matrice d'incidence est complétée par les contraintes suivantes (Table 3.9), $(V_1 = \text{fermée})_{/V_2\text{fermée}} \Leftarrow F_1 \vee F_{Sortie} \vee FD_0$

	V_1	V_2	Q_1	Q_2	Q_{Sortie}	FD_0
C_{11}	Fermée		1			
C_{12}		Fermée		1		
C_{13}			1	1	1	
C_6					1	1

TABLE. 2.9 – Matrice d'incidence de la vérification d'état et du mode système

2.5.6 Concept de recherche exhaustive

Dans notre travail, on a développé l'algorithme suivant pour la recherche exhaustive d'une grandeur physique inconnue à base d'un modèle structurel. Tout d'abord, nous le présenterons sous forme d'organigramme sur la figure 2.17.

2.5.6.1 Algorithme de recherche

L'algorithme suivant est utilisé pour chercher les différents chemins (**Meguetta,2013 b**) pour l'évaluation des variables inconnues en se basant sur la théorie des graphes :

L'algorithme de recherche

% Cet algorithme comporte différentes étapes qui s'agencent comme suit :

- 1. Soit S_c l'ensemble des contraintes :

$$S_c = \{S_{ci} \mid S_{ci} \in S_c\}$$

% Le nombre des contraintes est K

$$\text{Card}(S_c) = K$$

Soit v_i une variable dans la contrainte S_{ci}

$$S_{ci} = \{v_i \mid v_i \in V_i\}$$

% V_i est l'ensemble des variables

- 2. Soit v_0 une variable à rechercher

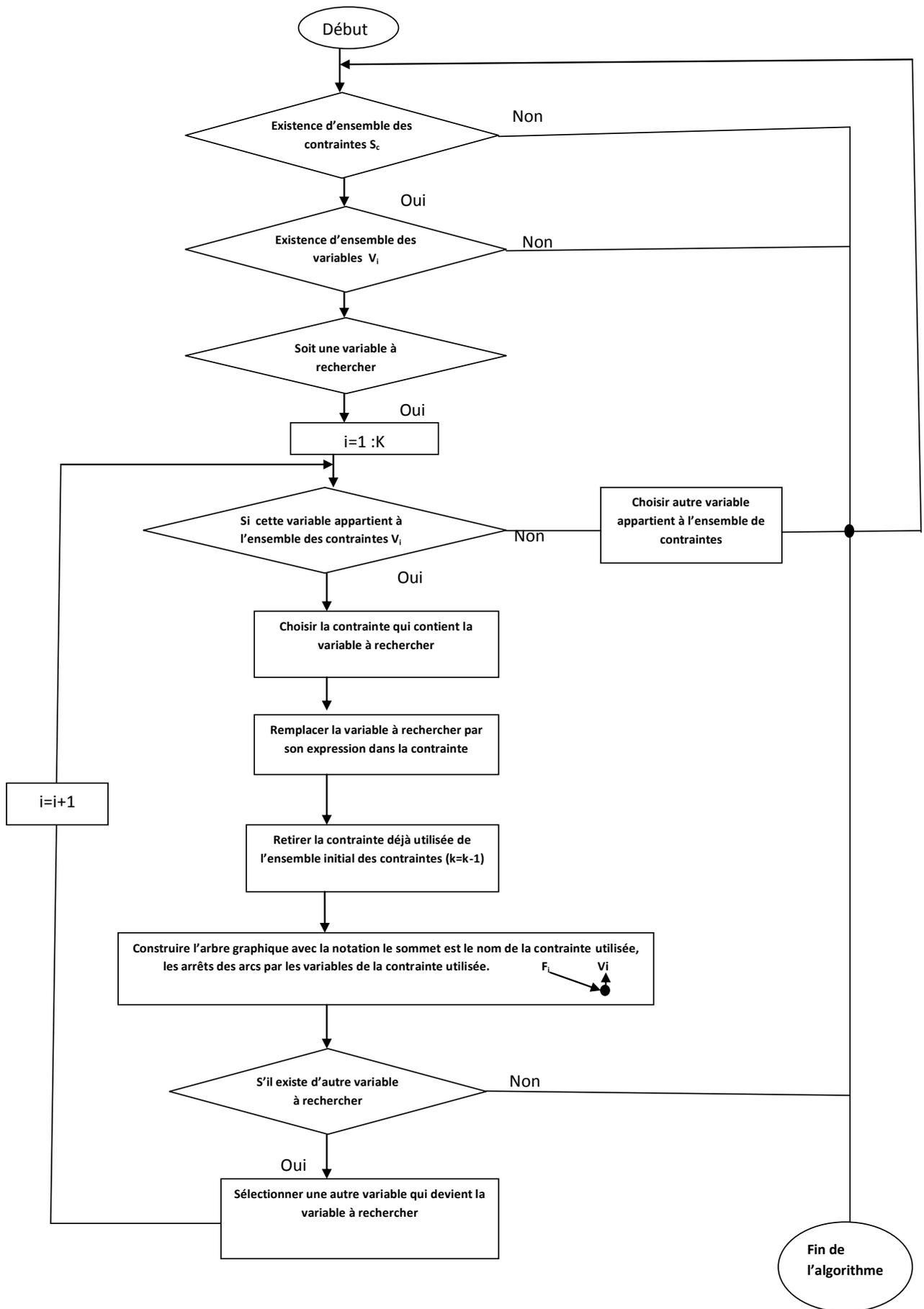


FIGURE. 2.17 – Principe de l'algorithme de recherche sous forme organigramme

- 3. Si $S_c \neq \phi$
 - Pour $i = 1 : K$
 - Si $v_i = v_0$
 - Faire
 - 3.1 Choisir la contrainte qui contient la variable à rechercher S_{c_0}

où :

$$S_{c_0} = \{v_0 \setminus v_0 \in V_i\}$$

% Sélectionner les contraintes qui contiennent cette variable v_0

3.2 Remplacer cette variable v_0 par son expression :

$$S_{c_0} \leftarrow v_0$$

$$v_0 = \{v_i \setminus v_i \in S_{c_0}\}$$

3.3 Retirer la contrainte déjà utilisée de l'ensemble initial S_c :

$$S_{c_0} \leftarrow S_c$$

- 4. Mise à jour du nombre actuel des contraintes :

$$K \leftarrow K - 1$$

% Construire l'arbre graphique avec la notation suivante : le sommet est le nom de la contrainte et les arrêts des arcs sont les variables appartenant à la contrainte utilisée.

- Si $V_i \neq \phi$
 - % Sélectionner une autre variable qui devient la variable à rechercher

$$i = i + 1$$

- 5. Aller au pas 3
 - Sinon
 - % L'étape finale.

Fin d'algorithme

2.5.6.2 Exemple d'application du principe général de l'algorithme de recherche

Dans cet exemple basique, notre objectif est de trouver a à base des équations (f_1 and f_2) (**Meguetta,2013 b**), étant données les équations suivantes :

$$\begin{aligned} f_1 &= a \wedge b \wedge c \\ f_2 &= c \wedge d \wedge e \end{aligned} \tag{2.18}$$

La solution :

En appliquant l'algorithme de recherche précédent, pour trouver les chemins de la grandeur physique a . Pour trouver a est direct par lui-même, ou par

TABLE. 2.10 – Le principe général

a				
x	b	c		
x	b	x	d	e

équation f_1 où $a = f(b, c)$, ou par f_2 et f_1 où $a = f(b, d, e)$ car $c = g(d, e)$. On obtient les chemins indiqués dans l'arbre graphique suivant, avec les noeuds qui caractérisent les contraintes qualitatives exprimant le comportement réel du système sans prendre leurs formes mathématiques particulières, les arcs représentent les liens entre les variables (des entrées et des sorties et des perturbations).

La figure 2.18 représente un arbre graphique contenant les chemins d'accès à la variable physique a .

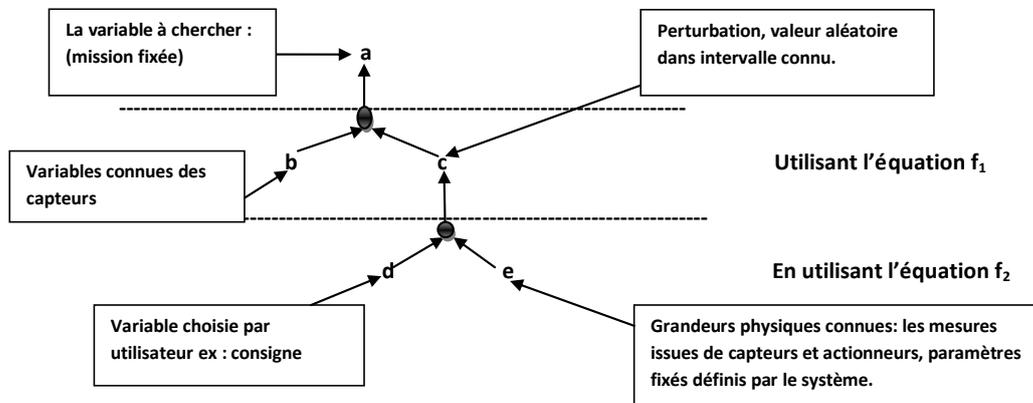


FIGURE. 2.18 – Les chemins d'évaluation de la variable a

Ici, le but important est de simplifier les équations structurales à l'aide de l'algorithme de facteur commun présenté précédemment. Ce dernier permet de réécrire les formules structurales qui seront utilisées pour l'application de l'algorithme de recherche présenté dans cette section.

On voudrait implanter cet algorithme dans notre algorithme de recherche de commande ; pour qu'il fournisse un résultat optimal ; c.-à-d. avant de commencer à appliquer notre algorithme de recherche ; il vaut mieux appeler cette réécriture (algorithme de facteurs communs) ; il convient de faire toutes les simplifications locales possibles pour essayer de maximiser les chances de trouver des facteurs communs.

Maintenant, nous proposons l'algorithme de recherche de commande (il est l'extension de l'algorithme de la section 2.5.6.1)

Algorithme de recherche de commande :

% L'algorithme de recherche comporte différentes étapes qui s'agencent comme suit

Entrée : L'ensemble des contraintes structurales

$$T = f_1(a, b, c), f_2(a, d, e), f_3(g, h, e), ..$$

Pas Initial :

Fixer la grandeur physique à chercher.

% u(t);

Pas 1 : Appel de l'algorithme qui a été proposé par **Nikolskaia**

% On fait la réécriture de base des équations structurales par l'algorithme de facteurs communs.

Pas 2 : Application de notre algorithme présenté dans la section 2.5.6.1

Pas final :

C'est la fin d'algorithme.

On va appliquer cet algorithme dans les exemples de la section suivante.

Exemple 1 Etant donnée les formules suivantes :

$$\begin{cases} f_1 = g_1 + g_2 + g_3 + g_4 \\ f_2 = g_1 + g_2 + g_3 + g_5 \\ f_3 = g_3 + g_4 + g_6 \\ f_4 = g_1 + g_2 + g_7 \end{cases}$$

En appliquant l'algorithme de la section 2.5.6.1.

Application de l'algorithme de recherche :

Pas initial : on cherche sur $g_5 = ?$

% C'est à dire $g_5 = ?$, Il ne va pas rentrer dans le choix des facteurs communs dans l'étape suivante.

Pas 1 :

% Appliquer l'algorithme de Nikolskaia (Algorithme facteur commun)

sous pas 1 : on identifie les facteurs communs d'une longueur $K = 2$; c-à-d maximum 2 facteurs communs.

On établie $FP : \langle g_1; g_2; g_3; f_1; f_2; \rangle, \langle g_1; g_2; f_1; f_2; f_4; \rangle, \langle g_4; g_3; f_1; f_3 \rangle$

sous pas 2 : Tant que $FP \neq \phi$; on choisit le couple comme facteur commun : $\langle g_1; g_2; f_1; f_2; f_4; \rangle$

Donc FP devient alors : $\langle g_3; g_3; g_4; f_1; f_3 \rangle$

Le résultat : le résultat de cette réécriture est alors :

$$\begin{cases} \hat{f}_1 = h_1 + h_2 \\ \hat{f}_2 = h_1 + g_3 + g_5 \\ \hat{f}_3 = h_2 + g_6 \\ \hat{f}_4 = h_1 + g_7 \end{cases} \text{ où: } \begin{cases} h_1 = g_1 + g_2 \\ h_2 = g_3 + g_4 \end{cases}$$

% Fin du résultat de Pas 1 :

Aller à pas 2 : Appliquer notre algorithme proposé.

% comme : g_5 la grandeur à chercher.

% le résultat de cet étape donné sous forme d'une figure 2.19 et une table 2.11.

% fin d'algorithme

Si, on applique notre algorithme directement (pas 2) sans faire le pas 1 (c'est à dire sans passer à l'algorithme de facteurs communs). On obtient, une figure plus compliquée avec des bouclages (voir figure 2.20).

Si on applique l'algorithme de facteurs communs, on obtient la figure 2.19.

Exemple 2 Etant données les formules suivantes (**Nikolskaia,2000**) :

TABLE. 2.11 – le principe général

g_5					
x	h_1	g_3			
x	x	g_3	g_7		
x	x	g_3	x	h_2	
x	x	g_3	x	x	g_6

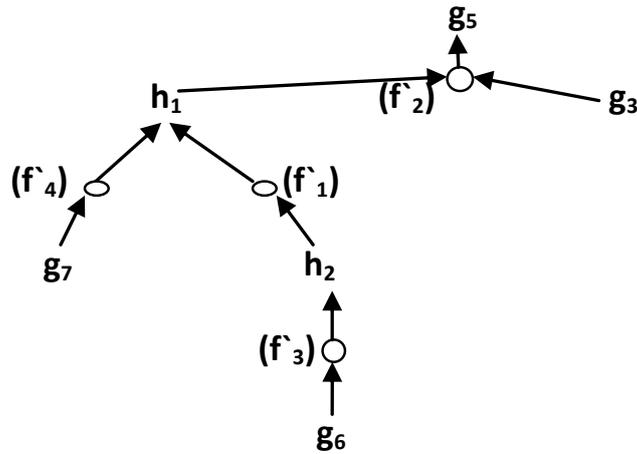


FIGURE. 2.19 – Figure simplifiée de l'exemple 1 en appliquant l'algorithme de facteur commun

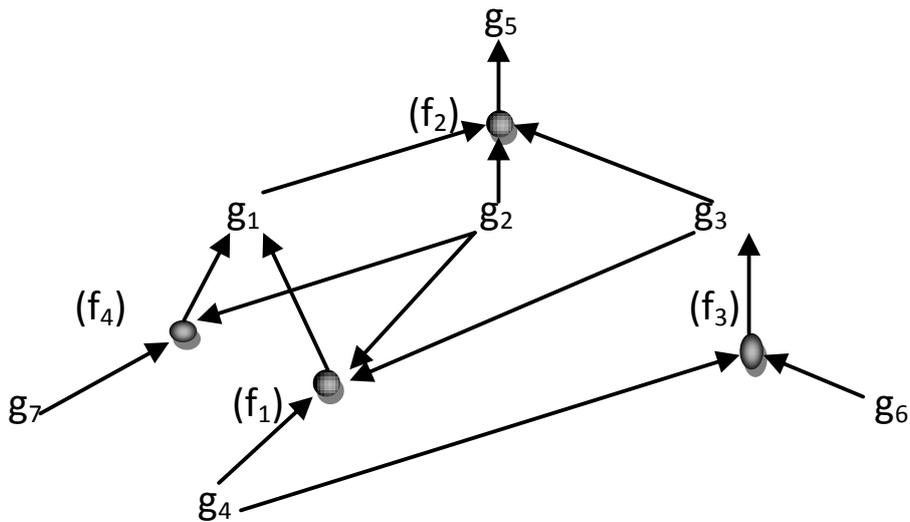


FIGURE. 2.20 – Figure d'un système complexe sans l'algorithme de facteur commun

$$\begin{cases} f & = & f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 \\ f_1 & = & a + d + e + b + c + h \\ f_2 & = & a + d + e + d + c \\ f_3 & = & d + c + e + b + a \\ f_4 & = & t + x + u + q + r + p \\ f_5 & = & x + u + c + q + a + t + d + r + e \end{cases}$$

En appliquant l'algorithme de la section 2.6.1.

Application de l'algorithme de recherche :

Pas initial : on cherche sur $h = ?$

% C'est à dire $h = ?$, Il ne va pas rentrer dans le choix des facteurs communs dans l'étape suivante.

Pas 1 :

% Appliquer l'algorithme de Nikolskaia

 sous pas 1 : on identifie les facteurs communs d'une longueur $K = 3$;
c-à-d maximum 3 facteurs communs.

 On établie FP :

$\langle a; d; e; c; f_2; f_3; f_5; f_1; \rangle, \langle a; d; e; b; c; f_3; f_1; \rangle, \langle a; d; e; c; f_3; f_5; f_2 \rangle, \langle a; d; e; c; f_5; f_2 \rangle, \langle a; d; e; c; f_5, f_3 \rangle,$
 $\langle t; x; u; q; r; f_5, f_4 \rangle$

 sous pas 2 : Tant que $FP \neq \phi$; on trouve :

Le résultat : le résultat de cette réécriture est alors :

$$\begin{cases} \hat{f} & = & \hat{f}_1, \hat{f}_2, \hat{f}_3, \hat{f}_4, \hat{f}_5 \\ \hat{f}_1 & = & b, h, v_1 \\ \hat{f}_2 & = & d, v_1 \\ \hat{f}_3 & = & b, v_1 \\ \hat{f}_4 & = & p, v_2 \\ \hat{f}_5 & = & v_1, v_2 \end{cases} \text{ où : } \begin{cases} v_1 & = & a, d, e, c \\ v_2 & = & t, x, u, q, r \end{cases}$$

 % Fin du résultat de Pas 1 :

 Aller à pas 2 :

 Appliquer notre algorithme proposé.

 % comme : h la grandeur à chercher.

 % résultat de cet étape donné sous forme d'une figure 2.21 et une table

2.12.

 % fin d'algorithme

TABLE. 2.12 – le principe général

f_i	a	d	e	b	c	t	x	u	q	r	h
f_1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
f_2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
f_3	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
f_4	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
f_5	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0

La figure avec l'application de l'algorithme de facteur commun donne la figure 2.21.

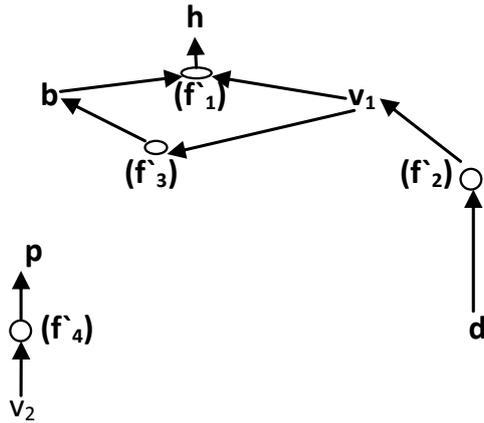


FIGURE. 2.21 – Figure simplifiée de l'exemple 2 avec l'application de l'algorithme de facteur commun

Quand on applique l'algorithme de l'étape 3 directement sans passer, par la recherche des facteurs communs (la réécriture), nous obtenons la figure 2.22.
 Quand on applique l'algorithme de l'étape 3 directement sans passer à rechercher les facteurs communs (la réécriture).

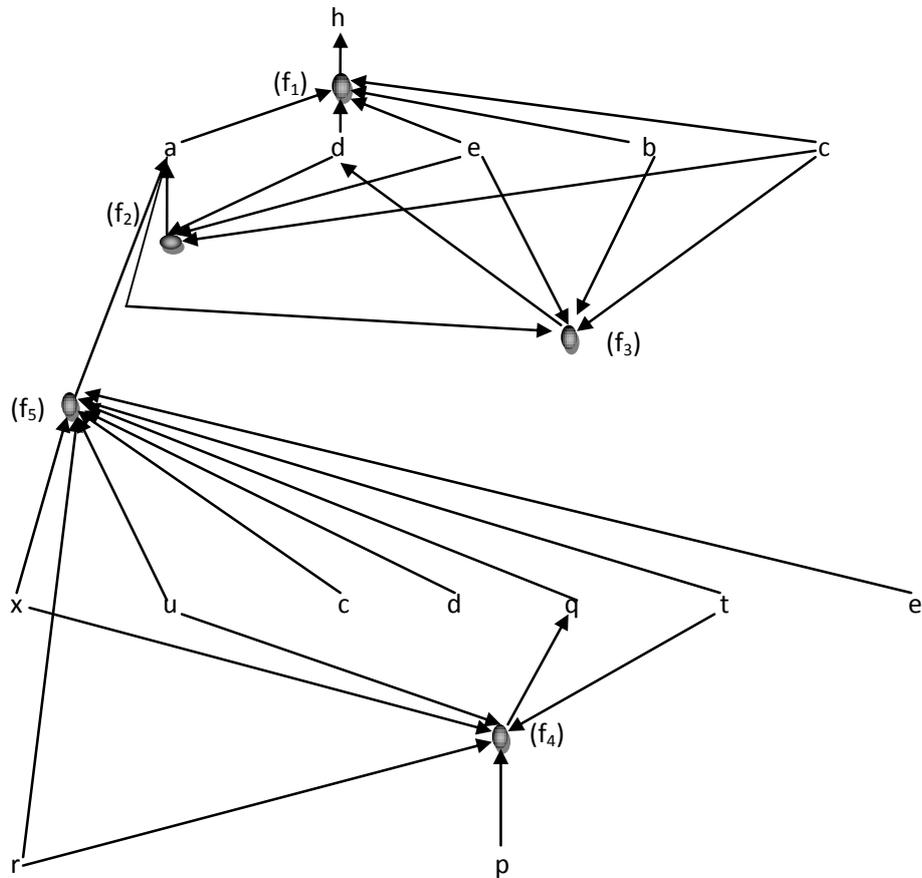


FIGURE. 2.22 – Figure compliquée de l'exemple 2 sans l'application de l'algorithme de facteur commun

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous remarquons que la modélisation structurelle donne une vision globale du système étudié. Dans un premier temps, nous avons présenté le principe général de modélisation, puis deuxièmement, comment représenter le modèle structurel par le graphe biparti, pour terminer par la présentation de quelques outils utilisés pour construire la matrice d'incidence.

Nous avons proposé une extension de l'analyse structurelle en introduisant la notion de mode de fonctionnement. Nous avons proposé un algorithme permettant de trouver les chemins structurels pour contrôler ou commander les grandeurs physiques inconnues. Cet algorithme peut donner des résultats simplifiés en l'associant avec l'algorithme de facteurs communs.

Ces chemins sont utiles dans la méthodologie de conception d'un système C–C sur la base d'un ensemble des spécifications et objectives (cahier des charges) qui définissent les critères des performances désirés par le concepteur.

Chapitre 3

Conception de l'instrumentation d'un système C–C grâce à une modélisation structurelle sous un critère d'optimisation de la qualité de commande et du coût

3.1 Introduction

Les besoins actuels de développement des véhicules autonomes et multitâches requièrent de nombreuses exigences concernant la conception de l'instrumentation de leur système de contrôle– commande (C–C). L'industrie automobile et les constructeurs recherchent ainsi des solutions de systèmes embarqués permettant de créer des véhicules fiables et sûrs de fonctionnement. Le système de contrôle d'un véhicule est l'un des systèmes les plus couramment rencontrés dans la vie quotidienne. Une des fonctions offertes est le maintien de la vitesse du véhicule constante malgré des perturbations provoquées par des changements dans la pente d'une route.

De nombreuses méthodes différentes pour estimer une des perturbations (la pente d'une route) peuvent être trouvées dans la littérature. Une des approches consiste à utiliser un capteur directement lié à la pente. Il est utilisé par exemple dans (**Bae,2001**) où la pente est déterminée en utilisant un système de positionnement global (*GPS*), qui fournit à la fois une vitesse verticale et horizontale. La pente de la route peut être déduite de ces vitesses. Une telle méthode dépend fortement de l'existence d'une haute qualité du signal *GPS*, ce qui n'est pas toujours disponible.

L'idée d'utiliser les informations des capteurs du véhicule pour trouver la pente de route a été également présentée dans (**Lingman,2001**) où un filtre de Kalman est utilisé pour traiter une force de propulsion mesurée ou estimée avec la force de freinage estimée et la vitesse mesurée. L'inconvénient de ces méthodes est qu'elles nécessitent un modèle précis du véhicule. Dans notre approche, nous voulons développer une méthode qui permette rapidement d'avoir une idée sur la commande d'un système complexe en travaillant sur un modèle basé sur peu d'information. En outre, nous développons une nouvelle méthode de conception basée sur des outils

graphiques structurels.

Associé à une demande croissante pour le contrôle de haute performance ainsi que pour plus de qualité et d'instrumentation, le contrôle de la dynamique des systèmes a fait l'objet d'efforts de recherche, au cours des dernières années. Dans l'analyse de la dynamique des systèmes, une approche reconnue est l'analyse structurelle.

Les références (**Blanke,2006**) et (**Lorentzen,2003**) présentent la méthode : l'analyse structurelle permet de déterminer tous les chemins possibles pour estimer une grandeur physique inconnue de celles qui sont connues comme des mesures ou des signaux de commande. Les références (**Conrard,2003**) et (**Conrard,2008**) donnent une extension du modèle structurel, afin de prendre en compte les différents modes de comportement et leurs caractéristiques spécifiques dans le cas d'un processus hydraulique. L'analyse structurelle est un outil important, qui offre un grand intérêt dans le stade précoce de la conception du système de contrôle et de supervision, alors que les modèles détaillés ne sont pas toujours disponibles (**Blanke,2003**).

L'objectif de concevoir un bon système de contrôle est de déterminer le meilleur schéma de contrôle d'instrumentation, c'est-à-dire, un ensemble de capteurs et d'actionneurs qui permet au système d'accomplir sa mission en dépit des perturbations de l'un ou de plusieurs de ses composants. L'approche de rejet de perturbation est étudiée par certains chercheurs (**Commault,1991**), (**Commault,1997**), (**Commault,2008**). La référence (**Commault,1991**) a présenté l'illustration du problème des perturbations par découplage par retour des mesures et résout ce problème en utilisant des techniques géométriques et graphiques. Dans (**Dion,2008**) le problème de rejet de perturbation pour les systèmes structurés est présenté : un graphe est associé à un tel système structuré. La référence (**Commault,1997**) montre de nouvelles solutions de prise en compte de la perturbation par découplage des problèmes par retour d'état et par retour de mesures produites, les conditions de solvabilité deviennent faciles à contrôler sur le graphe associé au système. Dans ces approches, le modèle d'état du système doit être disponible.

Le critère de qualité de commande peut être jugé à partir du dépassement dans le cas d'une réponse à un échelon, de la précision, de la marge de phase, du temps de montée, du temps de réponse, etc. Un critère de QoC pourra être une combinaison de ces critères (**Hung,2011**). Le critère de QoC peut aussi être défini comme fonction de l'erreur de position, comme c'est le cas dans la référence (**Mechraoui,2009**). Une autre approche est fournie dans (**Mechraoui,2009**), c'est celle de la Co-conception des systèmes commandés à travers un réseau sans fil ($WNCS$), l'intégration du réseau sans fil (WN) dans la boucle de commande influence la qualité de contrôle (QoC) du système en terme de la qualité de service (QoS) du réseau sans fil. Ce dernier présente une approche de Co-conception basée sur des réseaux bayésiens distribués. Cette approche permet de prendre des décisions pour assurer une bonne QoC , les résultats sont appliqués à un véhicule mobile qui doit s'arrêter devant plusieurs stations.

Pour notre étude, la qualité de commande QoC , concerne la capacité de garantir la robustesse d'un système en phase de conception, elle dépend essentiellement de

l'algorithme de commande. Elle est jugée par l'influence d'un certain nombre de perturbations (incertitudes des instruments, perturbations environnementales, ..) sur la mission visée à commander une grandeur physique inconnue à l'instant futur. Les valeurs de $QoC_{mission}$ sont comparées avec celle de l'incertitude de confiance $n_{\text{Incertainete de confiance}}$ pour atteindre cette mission. Malgré, l'influence de deux sources principales de perturbations : la variation de la pente de la route et les incertitudes des instruments. Pour étudier l'influence de ces derniers paramètres sur la qualité de commande, nous devons fixer les différents intervalles d'états de $QoC_{mission}$.

Ce chapitre est organisé comme suit. Dans un premier temps, nous allons expliquer la démarche de conception d'un système C-C. Puis, la formalisation et la résolution du problème d'optimisation seront discutées. Ensuite, la modélisation structurelle du véhicule électrique sera présentée ainsi que les procédures graphiques de la recherche des architectures d'instrumentation admissibles à la mission visée par le concepteur. Nous illustrons les résultats de l'étude de la qualité de commande QoC sur notre application, pour, enfin, conclure.

3.2 Démarche de conception

Les systèmes industriels se caractérisent par le résultat d'une combinaison de sous-systèmes de technologies différentes. Le cycle en V a d'abord été utilisé comme modèle de développement, il permet de positionner les différentes phases de conception : de la spécification jusqu'à la validation de produit (**Mechraoui,2010**). On s'intéresse à l'analyse des besoins et des spécifications, et des objectifs de la conception d'un système C-C comme ci- présentée dans la figure 3.1.

Notre méthodologie de conception réside sur deux aspects principaux : le premier concerne la modélisation structurelle, là nous allons dégager tous les chemins structurels pour accéder à la grandeur physique de la mission fixée par le concepteur en utilisant l'algorithme de recherche de la commande u_t (voir l'organigramme dans la figure 3.1).

Le deuxième aspect concerne les équations prenant en compte les incertitudes de mesures et les perturbations environnementales :

$$G_t = g_t \pm \epsilon_G$$

$$P_t = P_{t-\delta t} + \Delta p$$

Où : G_t est la grandeur mesurée par un instrument,

g_t est la mesure,

ϵ_G est l'incertitude de mesure,

P_t est la grandeur physique représentant la perturbation à l'instant présent t ,

$P_{t-\delta t}$ est la grandeur physique de cette perturbation à instant passé $t - \delta t$,

ΔP est la variation de la perturbation.

Cette approche de conception vise à obtenir une architecture optimale d'un système C–C répondant aux besoins et spécifications du concepteur sous bi– critère : la qualité de commande QoC et le moindre coût.

3.3 Algorithme de recherche de la commande

Nous nous référons ici au chapitre précédent qui présente le principe et les aspects de l'approche de l'analyse structurelle, ainsi que l'algorithme de recherche (voir la section 2.5.6.1). Cet algorithme vise à chercher les différents chemins pour évaluer les grandeurs physiques (Meguetta, 2013 b).

L'exemple d'application suivant présente le principe de l'algorithme de recherche de la commande.

Exemple d'application :

Dans cet exemple, notre objectif est de trouver les chemins pour accéder à la grandeur physique a à base des relations structurelles (f_1 , f_2 et f_3), étant données les équations structurelles suivantes :

$$\begin{aligned} f_1 &= a \wedge b \wedge c \\ f_2 &= c \wedge d \wedge e \\ f_3 &= b \wedge d \wedge g \end{aligned} \tag{3.1}$$

TABLE. 3.1 – le principe général

a					
x	b	c			
x	b	x	d	e	
x	x	c	d	x	g
x	x	x	d	e	g

Les différentes possibilités d'accès à la variable a sont :

- Directement par une mesure de a .
- Indirectement par la connaissance de b et c grâce à la relation f_1 .
- Ou par b, d, e grâce aux relations f_1 et f_2 .
- Ou par c, d, g grâce aux relations f_1 et f_3 .
- Ou enfin par d, e, g grâce à f_1 associée à f_2 et f_3 .

Dans la figure 3.2, les noeuds caractérisent les contraintes qualitatives exprimant le comportement réel du système sans prendre leurs formes algébriques particulières, les arcs représentent les liens entre les variables (des entrées et des sorties et des perturbations du système à concevoir).

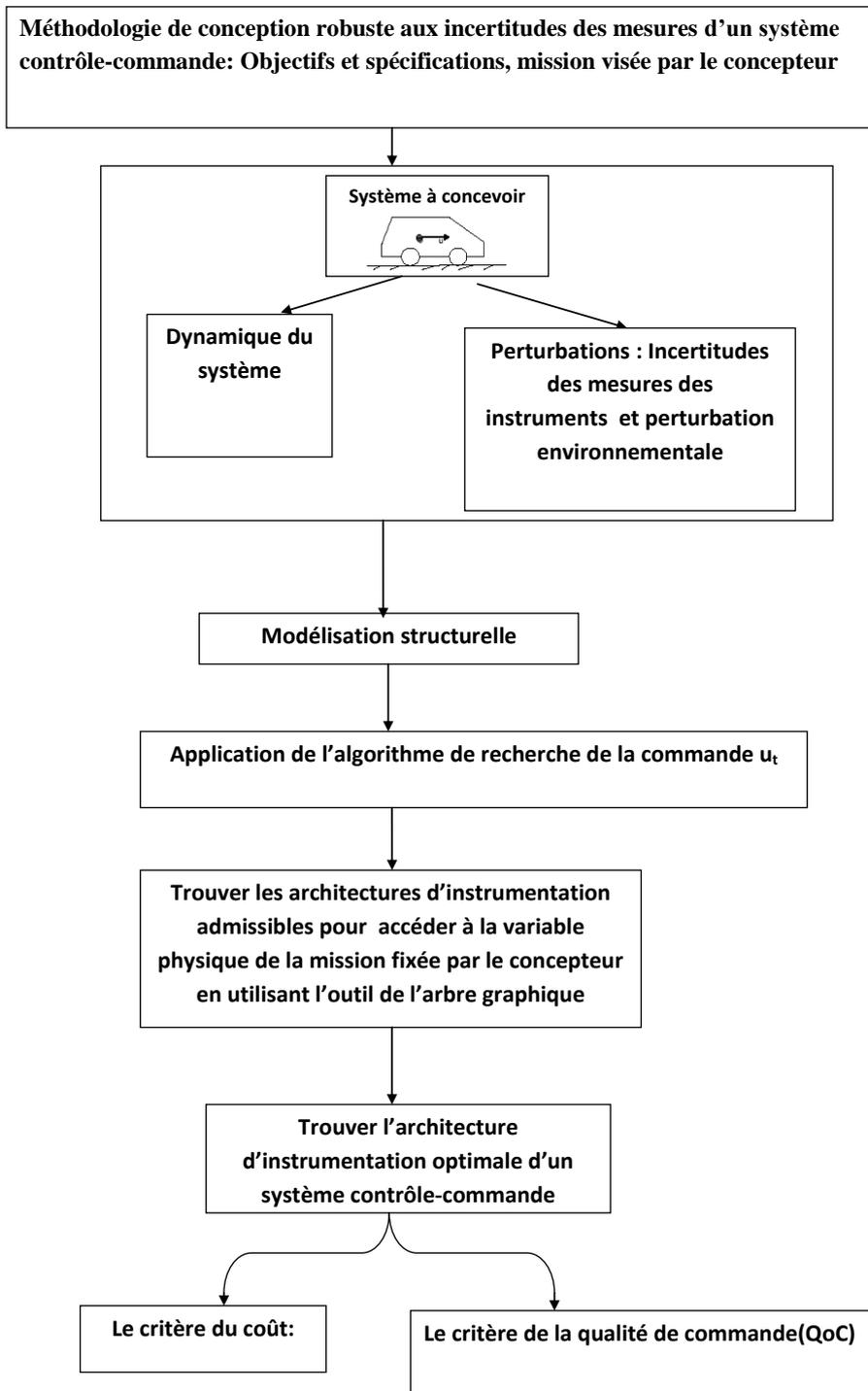


FIGURE. 3.1 – Méthodologie de conception d'un système C–C

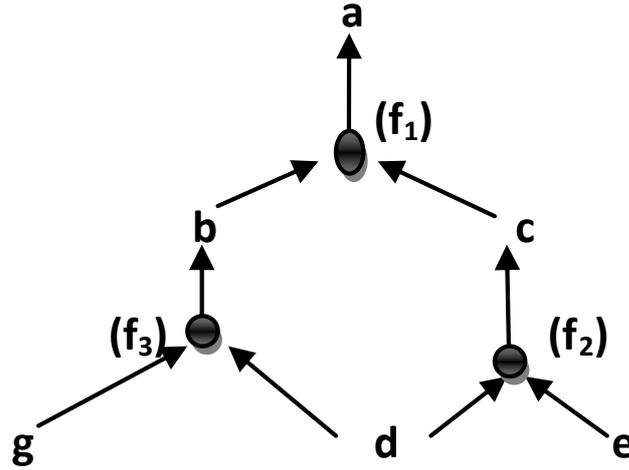


FIGURE. 3.2 – Les chemins d'évaluation de la variable a

3.4 Formalisation et résolution du problème d'optimisation

3.4.1 Spécification des contraintes de la qualité de commande

La modélisation structurelle permet de décrire un système C–C et l'approche de conception proposée vise à déterminer pour chaque grandeur physique inconnue, à contrôler ou à commander, une bonne qualité de commande QoC appropriée au processus d'instruments (capteurs et actionneurs). Lorsqu'il s'agit de concevoir un système de C–C, l'objectif est de déterminer l'instrumentation qui offrant un coût économique minimal, assure un niveau de qualité de commande QoC requis. Ce niveau doit être spécifié pour chaque mission ou tâche du système C–C à concevoir pour l'accomplissement de la mission visée par le concepteur (Meguetta, 2013 a).

Dans ce chapitre, la qualité de commande est définie comme la robustesse aux incertitudes des mesures des instruments et aux perturbations.

Physiquement, QoC est reliée à l'influence d'un certain nombre des perturbations (incertitudes des instruments, environnementales, ..) sur la mission de commande d'une grandeur physique à un instant futur.

Mathématiquement, QoC est la somme de toutes les perturbations trouvées dans l'architecture admissible pour accéder à la grandeur physique de la mission visée ; tout en comparant la valeur de cette dernière avec la valeur de l'incertitude à laquelle on fait confiance $n_{\text{Incertainde de confiance}}$ afin d'accomplir cette mission.

Pour $j = 1..l$, l'indice de la variation de nombre des architectures admissibles pour réaliser la mission fixée par le concepteur, le critère de QoC devient :

$$QoC = \sum_{j=1}^{j=l} (\text{toutes les natures des perturbations trouvées dans l'architecture admissible}) \quad (3.2)$$

3.4.2 Construction et résolution du problème d'optimisation

Le problème final d'optimisation est obtenu en associant le critère du coût à celui de qualité de commande QoC . La procédure d'optimisation vise à minimiser le coût global du système, c'est-à-dire la somme des coûts individuels des composants employés (noté C_i) et k_j est le nombre des instruments associés à l'architecture d'instrumentation admissible pour atteindre une mission.

Le problème d'optimisation est alors :

$$\begin{cases} Min(\sum_{i=1}^{i=k_j} C_{ij}) \\ QoC_j \leq n_{\text{Incertitude de confiance}} \end{cases} \quad (3.3)$$

Nous résolvons ce problème d'optimisation bi-critère par la méthode de priorité (Sherali, 1982), en mettant l'importance sur l'un des critères pris en compte dans la méthodologie de conception d'un système de C-C. Ici, la priorité est aux critères techniques plutôt qu'économiques; c'est à dire, que nous mettons l'accent fort sur le critère de qualité de commande QoC , ceci est intéressant dans le cas où l'architecture admissible ne possède pas un coût financier minimum.

Le résultat final aboutit à la meilleure instrumentation qui, à coût minimal, respecte le critère de la qualité de commande QoC imposée par le concepteur.

3.5 Cas d'étude : Conception de l'instrumentation d'un véhicule électrique

3.5.1 Objectif et l'intérêt de la modélisation structurelle

Dans cette section, nous allons montrer que l'analyse structurelle est une méthode rapide qui permet de dégager les relations structurelles de la variable physique de la mission visée dans les spécifications et les objectifs de la démarche de conception. Ici, son intérêt est de trouver rapidement les chemins structurels entre les variables physiques à base de l'analyse structurelle tout en recherchant les architectures admissibles pour commander la vitesse à l'instant futur $v_{t+\delta t}$ sachant que le comportement du cas d'étude, celui du véhicule électrique est non maîtrisable (peu d'information dans le cas où le véhicule se déplace sur une route avec pente variable¹) comme illustré dans la figure 3.3. De ce fait, les points principaux de notre méthodologie de conception sont :

- Le passage du modèle analytique au modèle discret en utilisant l'approche 1 (l'extension du modèle structurel en ajoutant des nouvelles équations obtenues grâce à la traduction de l'opérateur différentiel) présentée dans le chapitre 2.
- Une classification des familles des variables (connues, inconnues, perturbations, ..)
- La recherche des liens structurels rapidement à travers l'arbre graphique.

1. Variation de la pente entre dates successives selon cet équation $\alpha_t = \alpha_{t-\delta t} + \Delta\alpha_t$

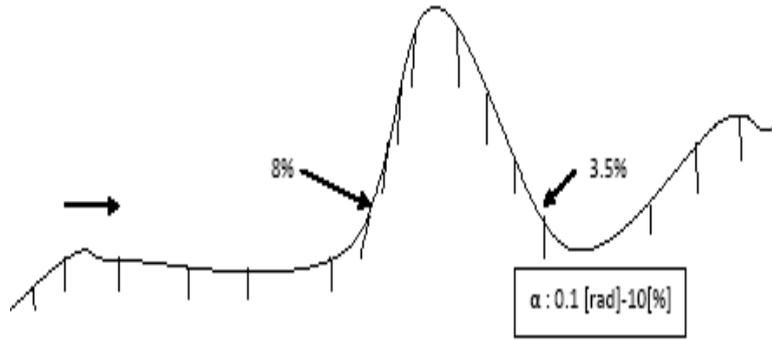


FIGURE. 3.3 – Route ondulée avec pente variable

3.5.2 Description du processus

Nous considérons un véhicule électrique se déplace sur une route avec une pente variable dans la figure 3.4. Les instruments qui sont disponibles dans le véhicule sont :

Moteur électrique U ,

Capteur de vitesse Cv ,

GPS ,

Inclinomètre I pour mesurer l'angle de la pente de la route,

CH est un chronomètre qui mesure le temps de descente véhicule électrique sur route avec pente.

Nous considérons les variables suivantes :

$a_t, a_{t-\delta t}$ représentent les variables d'accélération de véhicule à différentes dates,

$v_{t+\delta t}, v_t, v_{t-\delta t}$ sont les vitesses du véhicule électrique aux dates successives : $t + \delta t$, t et $t - \delta t$,

$x_t, x_{t-\delta t}, x_{t-2\delta t}$ représentent les positions de véhicule électrique à différentes dates,

$u_t, u_{t-\delta t}$ sont les commandes de moteur électrique à différentes dates,

gps est la mesure issue de GPS ,

ch est la mesure issue de chronomètre,

$\alpha_t, \alpha_{t-\delta t}$ représentent les pentes à différentes dates.

Les paramètres sont définis par :

- δt est la période d'échantillonnage issue de la transposition du modèle continu au discret,
- M est un paramètre fixé par le modèle de comportement, qui représente la masse de véhicule,
- m_t est la masse réelle du véhicule,
- Δm_t est la variation de la masse issue de la charge transportée sur le véhicule,
- $t_{descent}$ est le temps de descente sur un profil de la pente de route constante,
- cv_t est la vitesse mesurée par le capteur de vitesse,
- $\epsilon_v^t, \epsilon_v^{t-\delta t}$ sont des incertitudes de mesures de vitesse par le capteur de vitesse à différentes dates,
- I_t est la pente mesurée par l'inclinomètre,
- ϵ_I^t est l'incertitude de mesure de la pente par l'inclinomètre,
- $\Delta \alpha_t$ est la variation de la pente de la route,

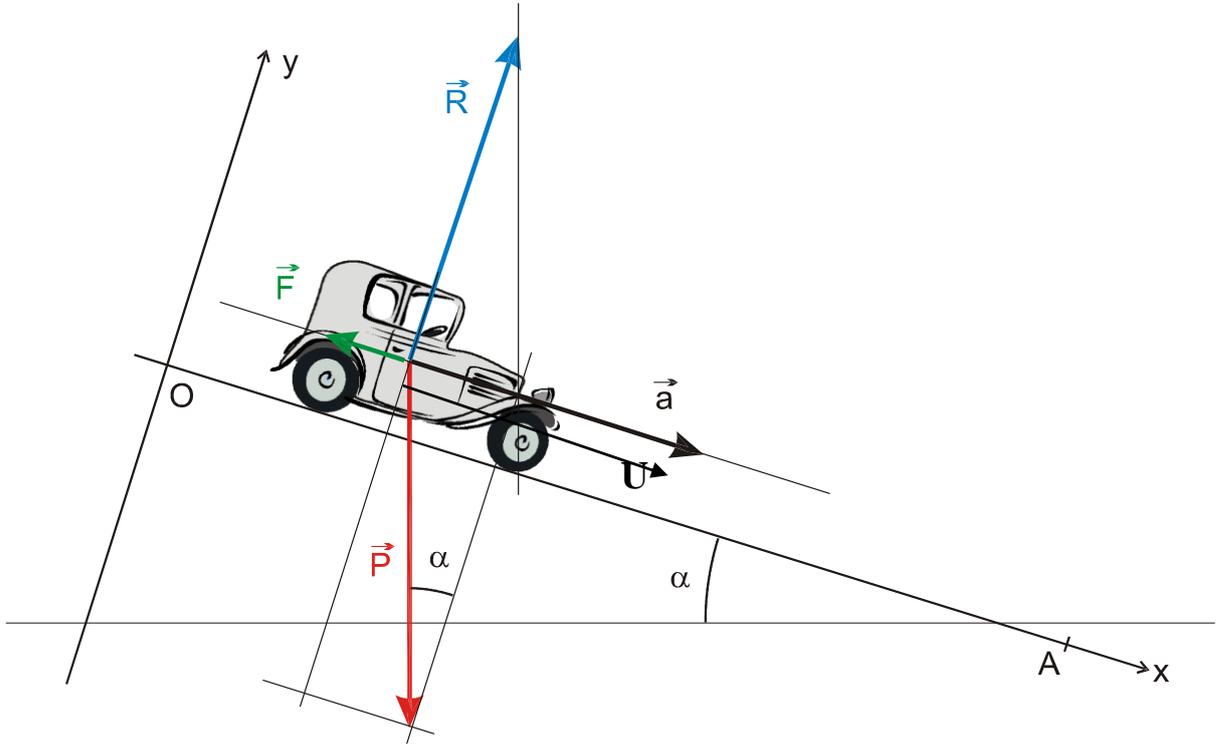


FIGURE. 3.4 – Modèle dynamique de véhicule électrique

- $\epsilon_{gps}^t, \epsilon_{gps}^{t-\delta t}$ sont les incertitudes de mesures de la position par *GPS*,
- \vec{R} est la force de la réaction de la terre,
- \vec{F} est la force de frottement sur le profil de la route (sa valeur constante),
- \vec{P} est la force de poids de la charge du véhicule électrique sur une route avec pente.

Nous présenterons dans le tableau 3.2 le modèle global du véhicule électrique qui se déplace dans une route avec pente. Ici, nous considérons deux études concernant deux types de la pente : route avec une pente constante (profil de route rectiligne) et profil de route avec une pente variable (route ondulée).

Cette section présente l'utilisation d'algorithme de recherche de la commande $u(t)$ sur notre cas d'étude. A partir des équations suivantes, l'algorithme de recherche de la commande sera appliqué sur ces équations sachant que la période d'échantillonnage δt est une constante connue.

Le modèle structurel du système est donné par :

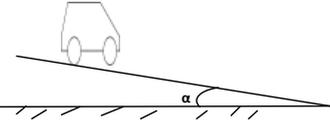
Equations générales (pente constante ou variable) :

$$f_1(a_t, v_{t+\delta t}, v_t, \delta t) = 0$$

$$f_2(a_t, \alpha_t, m_t, u_t) = 0$$

$$f_3(v_t, x_t, x_{t-\delta t}, \delta t) = 0$$

TABLE. 3.2 – Description détaillée du véhicule électrique

Modèle dynamique	Modèle du continu au discret (Approche 1)
<p>Cas 1 : Profil de la route avec pente constante</p> $a_t = \frac{dv_t}{dt}$ <p>La projection de \vec{a} sur l'axe x, avec $\vec{a}_y = 0$:</p> $a_x = g \sin(\alpha_t) - \frac{F}{m_t} + \frac{u_t}{m_t}$ $v_t = \frac{dx_t}{dt}$ 	$a_t = \frac{v_{t+\delta t} - v_t}{\delta t}$ $a_t = g \sin(\alpha_t) - \frac{F}{m_t} + \frac{u_t}{m_t}$ $x_t = 1/2 a_x t^2_{descente} + v_0 t + x_0$ <p>Avec v_0 et x_0 sont des variables initiales nulles.</p>
<p>Cas 2 : Profil de la route avec pente variable</p>  <p>*La pente variable se définit par un vecteur dérivé comme suit :</p> $\alpha_{variable} = \frac{d\alpha_t}{dt}$ <p>*Comportement inconnu *Peu d'information sur le modèle dynamique du véhicule électrique</p>	$\alpha_t = \alpha_{t-\delta t} + \Delta\alpha_t$
<p>La prise en compte des incertitudes dans la conception :</p> <p>Les instruments de mesures :</p> <ul style="list-style-type: none"> *Capteur de vitesse *Inclinomètre *GPS *La variation de la pente 	$cv_t = v_t + \epsilon_v^t$ $I_t = \alpha_t + \epsilon_I^t$ $gps = x_t + \epsilon_{gps}^t$ $\Delta\alpha_t = \alpha_t - \alpha_{t-\delta t}$

$$f_{12}(a_{t-\delta t}, v_{t-\delta t}, v_t, \delta t) = 0$$

$$f_{13}(a_{t-\delta t}, \alpha_{t-\delta t}, m_{t-\delta t}, u_{t-\delta t}) = 0$$

$$f_{15}(v_{t-\delta t}, x_{t-\delta t}, x_{t-2\delta t}, \delta t) = 0$$

Equations d'incertitude de mesures des instruments :

$$f_3(cv_t, v_t, \epsilon_v^t) = 0$$

$$f_4(gps, x_{t-\delta t}, \epsilon_{gps}^t) = 0$$

$$f_5(I_t, \alpha_t, \epsilon_I^t) = 0$$

$$f_6(c_v^{t-\delta t}, v_{t-\delta t}, \epsilon_v^{t-\delta t}) = 0$$

Equations valides pour la pente de la route constante :

$$f_8(t_{descent}, x_t, a_t) = 0$$

$$f_{10}(ch, t_{descent}, \epsilon_{ch}^t) = 0$$

Hypothèse sur le changement de masse :

$$f_7(m_{t-\delta t}, M, \Delta m_{t-\delta t}) = 0$$

$$f_{11}(m_t, M, \Delta m_t) = 0$$

Equation de perturbation environnementale (pente de la route variable) :

$$f_{14}(\alpha_t, \alpha_{t-\delta t}, \Delta \alpha_t) = 0$$

3.5.3 Résultat de l'algorithme sur le véhicule électrique

En appliquant l'algorithme de recherche précédent, nous trouvons les différents chemins structurels pour évaluer la commande $u(t)$ dans la table 3.3, dans chaque ligne dans cette table, nous remplaçons les variables physiques par leurs expressions structurelles, en mentionnant la variable déjà utilisée par une case supprimée (voir x dans la table).

Dans le modèle structurel décrivant le système cité dans la section 3.5.2, la pente α_t apparaît dans deux équations dans l'ensemble des contraintes structurelles descriptif du système comme expliqué dans l'équation suivante. Nous avons deux façons possibles d'accès à la pente α_t (voir l'arbre dans la figure 3.5). Nous avons utilisé deux parcours différents dans le tableau : une fois, nous avons remplacé par l'équation $\alpha_t = \alpha_{t-\delta t} + \Delta \alpha_t$ et l'autre fois par $I_t = \alpha_t + \epsilon_I^t$.

$$\begin{aligned} \alpha_t &= \alpha_{t-\delta t} + \Delta\alpha_t \\ I_t &= \alpha_t + \epsilon_I^t \end{aligned} \quad (3.4)$$

La figure 3.5 représente graphiquement les noeuds et des arcs ; sachant que, chaque noeud de cet arbre code une formule algébrique f_i et peut se lire comme opérateur arithmétique (addition, soustraction,..), il est étiqueté par des variables (les arrêtes entrantes) selon l'équation algébrique. Dans cette figure, la commande $u(t)$ peut être évaluée à partir de différentes variables physiques du système et des perturbations.

3.5.4 Modélisation structurelle du véhicule électrique

Nous pouvons aussi représenter le système du véhicule électrique sous la matrice d'incidence donnée par la table 3.4. L'objectif de cette représentation est de dégager des propriétés structurelles du système. Celles-ci serviront de guide pour une mise en oeuvre plus complète qui utilisera le modèle de comportement. On ne garde du modèle de comportement que les informations qui expriment l'existence de relations entre les variables sans prendre en compte leur forme particulière. Les résultats obtenus seront donc indépendants des modèles de comportement de chaque mode ou état du système étudié. Aucune restriction n'est à faire sur le type de modélisation à utiliser.

TABLE. 3.4 – Matrice d'incidence globale du véhicule électrique

	<i>Per_{envi}</i>		Grandeurs physiques										Actionneurs		Capteurs				<i>Per_{mod}</i>			<i>Etat_{sys}</i>	
	α_t	$\alpha_{t-\delta t}$	$c_v^{t-\delta t}$	a_t	$a_{t-\delta t}$	$v_{t+\delta t}$	v_t	$v_{t-\delta t}$	x	δt	t_{des}	a_y	$\Delta\alpha_t$	u_t	$u_{t-\delta t}$	Cv	GPS	CH	I	m_t	$m_{t-\delta t}$	Δm_t	cas_α
f_1			1			1				1													var
f_2	1			1									1							1			con,var
f_3							1								1								con,var
f_4										1						1							con,var
f_5	1																	1					con
f_6			1							1													con
f_7				1																	1	1	con,var
f_8									1			1											con
f_9																							con
f_{10}																		1					con
f_{11}																				1		1	var
f_{12}					1		1	1															con,var
f_{13}		1			1								1								1		con,var
f_{14}	1	1										1											var
f_{15}								1															var

3.6 Application QoC sur notre cas d'étude

3.6.1 Spécification sur QoC

Nous allons ici donner la définition de la QoC qui concerne la capacité de garantir la robustesse d'un système, avant d'étudier la QoC , nous allons citer les paramètres qui l'influencent :

- La variation de la pente $\Delta\alpha_t$ de la route (surtout dans le cas des routes qui ont des fortes pentes).
- Les incertitudes de mesures pour les instruments (GPS, le capteur de vitesse et l'inclinomètre)

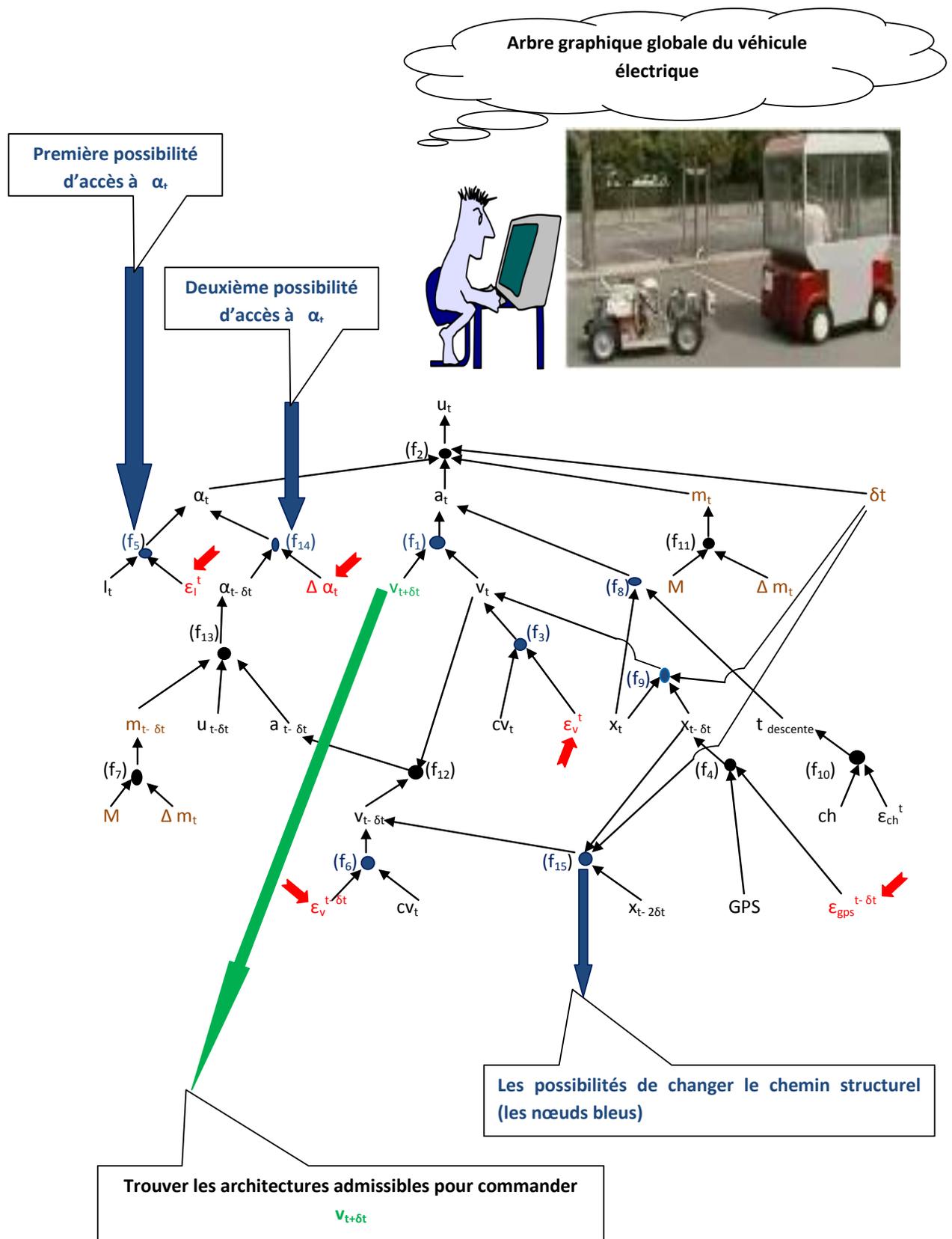


FIGURE. 3.5 – Les différents chemins pour évaluer la commande u_t avec plusieurs perturbations

3.6.2 La recherche des architectures admissibles

Nous recherchons les architectures d'instrumentation admissibles pour accéder à la variable physique de la mission visée par le concepteur, celle de la vitesse du véhicule électrique $v_{t+\delta t}$ à l'instant futur $t + \delta t$.

On trouve cinq architectures admissibles pour réaliser cette mission, tout en expliquant les procédures de recherche d'architectures concernées à commander $v_{t+\delta t}$, dans les 5 figures suivantes avec l'utilisation de l'outil de l'arbre graphique.

3.6.3 L'application sur notre cas d'étude

Pour étudier l'influence des perturbations (la variation de pente de route, les incertitudes des instruments) sur la qualité de commande QoC du système étudié, nous allons appliquer le critère de QoC illustré dans l'équation 3.2.

Alors, l'étude de $QoC_{v_{t+\delta t}}$ pour les cinq architectures admissibles, avec $j = 1, ..5$:

$$QoC_{v_{t+\delta t}} = \sum_{j=1}^{j=5} (\epsilon_{instrument:GPS_j, C_{v_j}, I_j}, \Delta\alpha_{tj}) \quad (3.5)$$

Nous utilisons les mêmes instruments pour mesurer les grandeurs physiques à différentes dates ($t, t - \delta t, t - 2\delta t$), la définition des paramètres utilisés est :

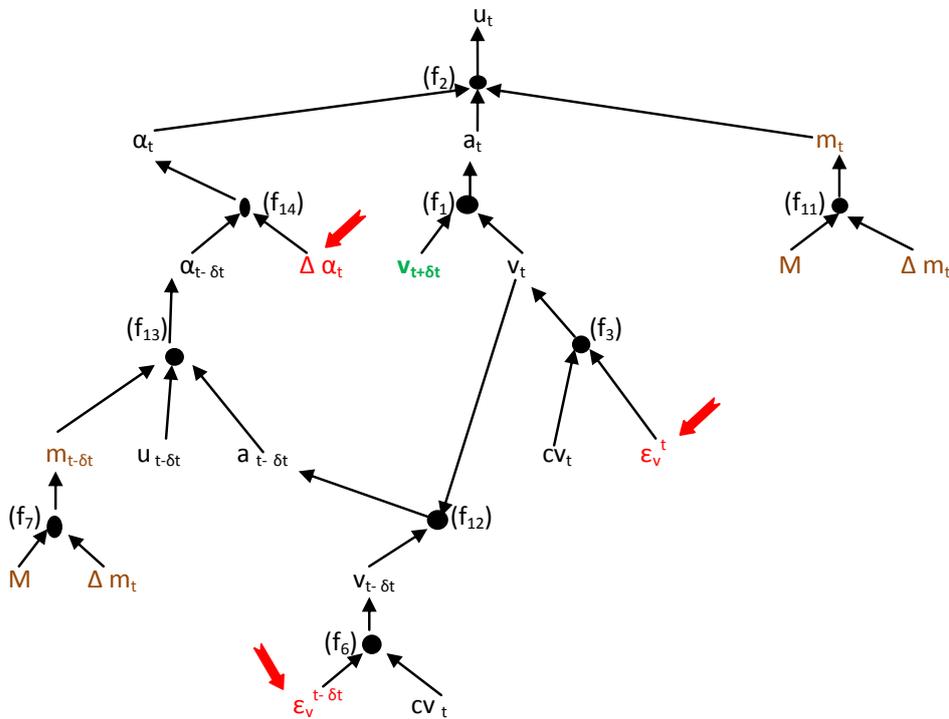
- Deux types de perturbations, la première est la variation de pente $\Delta\alpha_t = 33\%$ et l'incertitude de capteur de vitesse ($\epsilon_v^t = \epsilon_v^{t-\delta t} = 30 \cdot 10^{-2}$) et celle de l'inclinomètre ($\epsilon_I^t = 25 \cdot 10^{-2}$) et GPS $\epsilon_{gps}^t = \epsilon_{gps}^{t-\delta t} = 45 \cdot 10^{-3}$.
- On choisit arbitrairement les valeurs des coûts associés aux instruments disponibles dans les 5 architectures admissibles pour réaliser la mission de commande $v_{t+\delta t}$, $C_{GPS} = 14$ le coût pour le *GPS*, $C_{Cv} = 12$ le coût du capteur de vitesse, $C_I = 10$ le coût de l'inclinomètre.

TABLE. 3.5 – L'évaluation numérique de $QoC_{v_{t-\delta t}}$

Architecture d'instrumentation admissibles	Incertitudes des Instruments et perturbation	QoC	Coût d'instrumentation
<i>Archi</i> ₁	$\Delta\alpha_t, \epsilon_v^t, \epsilon_v^{t-\delta t}$	0.93	12
<i>Archi</i> ₂	$\epsilon_I^t, \epsilon_v^t$	0.55	22
<i>Archi</i> ₃	$\epsilon_I^t, \epsilon_{gps}^t$	0.295	24
<i>Archi</i> ₄	$\Delta\alpha_t, \epsilon_{gps}^{t-\delta t}$	0.375	14
<i>Archi</i> ₅	$\Delta\alpha_t, \epsilon_v^{t-\delta t}$	0.63	12

En appliquant le problème d'optimisation cité dans l'équation 3.3, et avec la valeur de l'incertitude de confiance $n_{\text{Incertainde de confiance}}$ égale $30 \cdot 10^{-2}$. On obtient, pour les cinq architectures d'instrumentation admissibles *archi*_{*j*} avec $j = 1, ..5$:

Trouver les architectures admissibles
pour commander $v_{t+\delta t}$

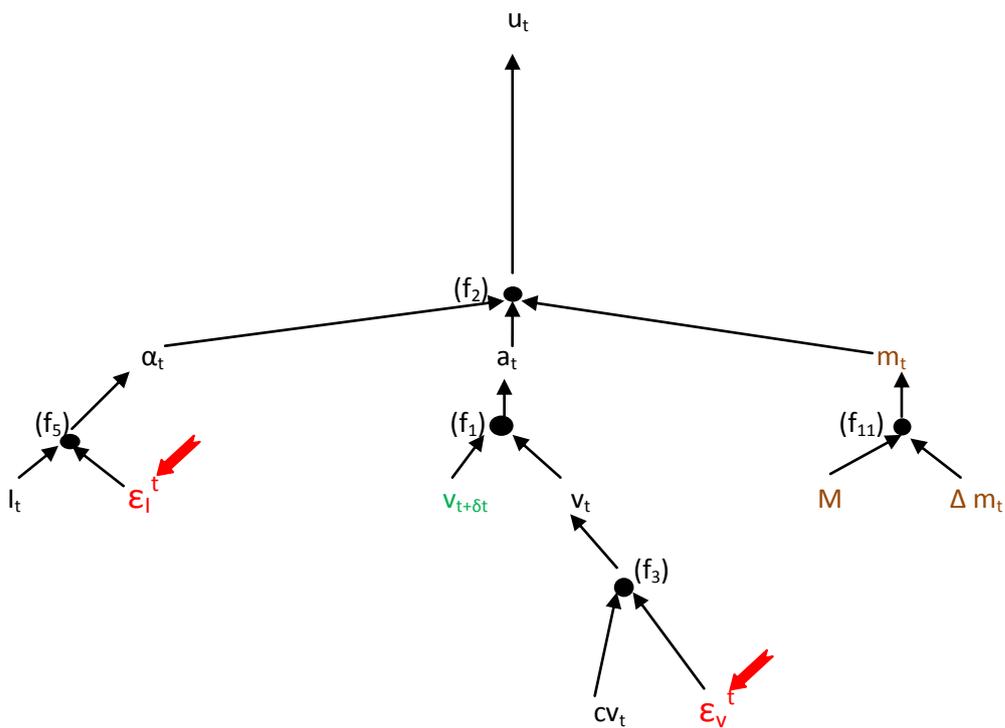


$m_{t-\delta t}$, Δm_t , M , m_t : sont des paramètres considérés constants.

ϵ_v^t , $\epsilon_v^{t-\delta t}$, $\Delta \alpha_t$: représentent respectivement deux types de perturbations, incertitudes de mesure à deux dates différentes de capteur de vitesse et la variation de la pente (Perturbation environnementale).

FIGURE. 3.6 – Architecture admissible 1

Trouver les architectures admissibles
pour commander $v_{t+\delta t}$

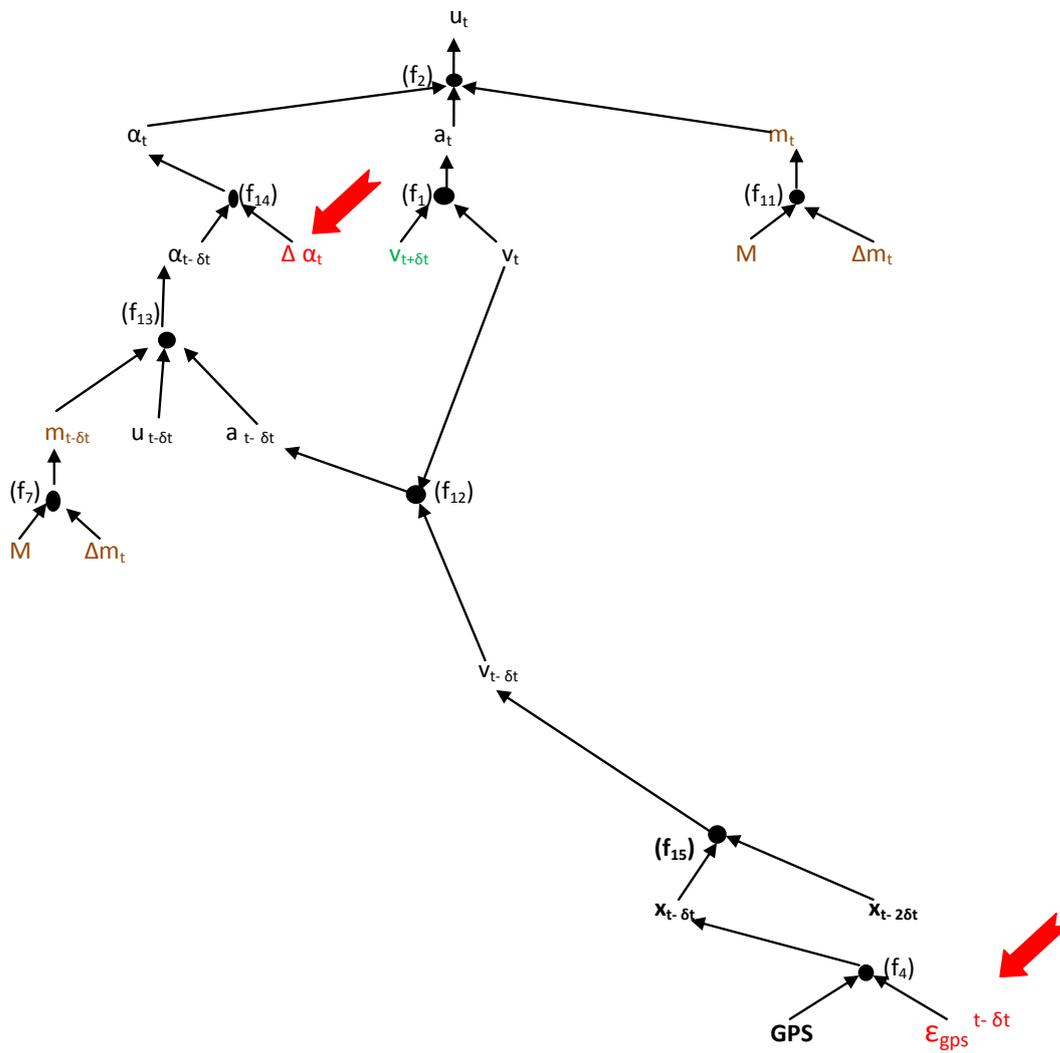


$\Delta m_t, M, m_t, \delta_t$: sont des paramètres considérés constants.

$\epsilon_v^t, \epsilon_l^t$: représentent respectivement les incertitudes de mesure de capteur de vitesse et l'inclinomètre.

FIGURE. 3.7 – Architecture admissible 2

Trouver les architectures admissibles
pour commander $v_{t+\delta t}$

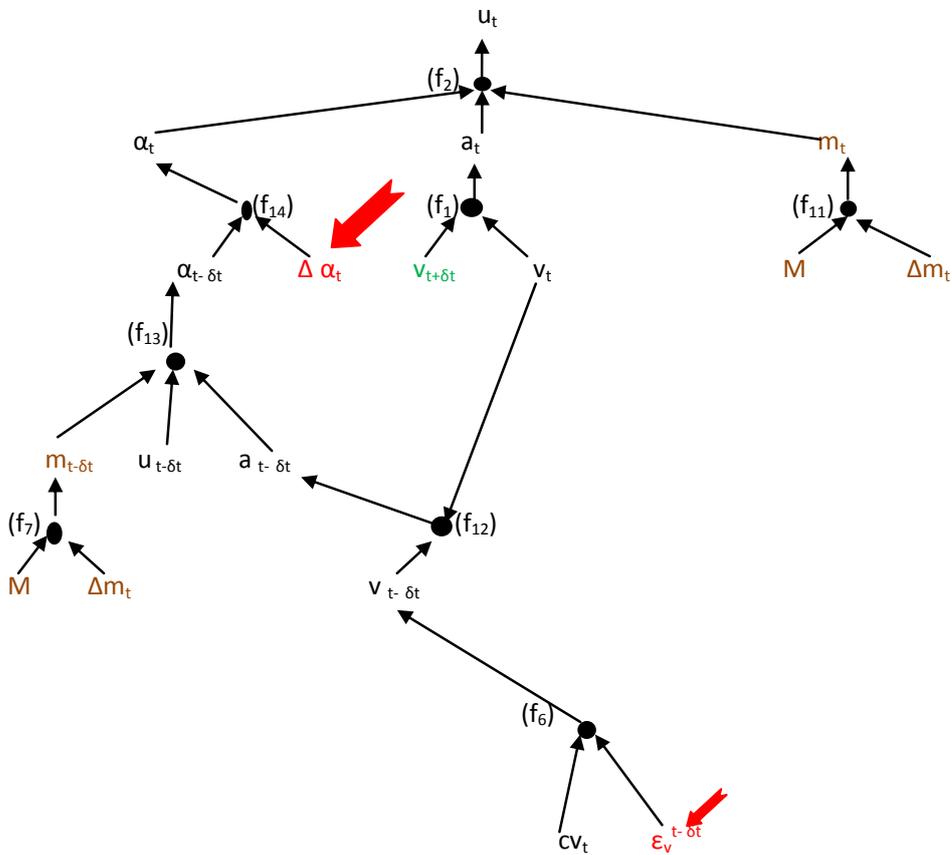


$m_{t-\delta t}, \Delta m_t, M, m_t, \delta_t$: sont des paramètres considérés constants.

$\epsilon_{gps}^{t-\delta t}, \Delta \alpha_t$: représentent respectivement deux types de perturbations, incertitudes de mesure de GPS et la variation de la pente (Perturbation environnementale).

FIGURE. 3.9 – Architecture admissible 4

Trouver les architectures admissibles pour commander $v_{t+\delta t}$



$m_{t-\delta t}, \Delta m_t, M, m_t, \delta_t$: sont des paramètres considérés constants.

$\epsilon_v^{t-\delta t}, \Delta \alpha_t$: représentent respectivement deux types de perturbations, incertitudes de mesure de capteur de vitesse et la variation de la pente (Perturbation environnementale).

FIGURE. 3.10 – Architecture admissible 5

$$\begin{cases} \text{Min}(\sum_{i=1}^{i=3} C_{ij}) \\ QoC_{v_{t+\delta t}(archi_j)} \leq 30 \cdot 10^{-2} \end{cases} \quad (3.6)$$

Comme le tableau précédent montre les résultats de QoC pour $j = 5$ architectures admissibles d'instrumentation ($archi_1 \dots archi_5$), le problème d'optimisation devient :

$$\begin{cases} \text{Min}(C_{ij}) \\ QoC_{v_{t+\delta t}(archi_1)} \leq 30 \cdot 10^{-2} \\ QoC_{v_{t+\delta t}(archi_2)} \leq 30 \cdot 10^{-2} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ QoC_{v_{t+\delta t}(archi_5)} \leq 30 \cdot 10^{-2} \end{cases} \quad (3.7)$$

Maintenant, on discute sur l'état de la qualité de commande selon sa valeur, comme le suit :

- $QoC_{v_{t+\delta t}}$ est bonne , si $QoC \in [0, 30 \cdot 10^{-2} [$
- $QoC_{v_{t+\delta t}}$ est dégradée ,si $QoC \in [30 \cdot 10^{-2}, 65 \cdot 10^{-2} [$
- $QoC_{v_{t+\delta t}}$ est mauvaise ,si $QoC \in [65 \cdot 10^{-2}, 95 \cdot 10^{-2} [$

Afin d'étudier l'influence des perturbations sur la $QoC_{v_{t+\delta t}}$ de la mission de commander la vitesse du véhicule électrique. Nous avons choisi l'algorithme suivant pour connaître l'état de la QoC (bonne, dégradée ou mauvaise) en fixant les intervalles des différent états de la QoC .

Après avoir calculé les valeurs du critère de QoC de chaque architecture d'instrumentation admissible, cet algorithme donne au concepteur l'état de la qualité de commande QoC rapidement.

Algorithme de l'état de $QoC_{v_{t+\delta t}}$

Si $0 \leq QoC_{v_{t+\delta t}} < 30 \cdot 10^{-2}$
 $QoC = \text{bonne}$
Sinon
Si $30 \cdot 10^{-2} \leq QoC_{v_{t+\delta t}} < 65 \cdot 10^{-2}$
 $QoC = \text{dégradée}$
Sinon
Si $65 \cdot 10^{-2} \leq QoC_{v_{t+\delta t}} < 95 \cdot 10^{-2}$
 $QoC = \text{mauvaise}$
Fin Si

On trouve que l'architecture optimale est $archi_3$, elle se compose par un GPS avec une incertitude de mesure ($\epsilon_{gps}^t = 45 \cdot 10^{-3}$), et un inclinomètre avec une incertitude de mesure ($\epsilon_I^t = 25 \cdot 10^{-2}$).

La valeur de coût de cette architecture d'instrumentation admissible égale (24), la valeur de qualité de commande est $QoC_{v_{t+\delta t}}(archi_2) = 0.295$. On constate que l'intérêt de placer l'inclinomètre dans cette architecture d'instrumentation choisie, est de minimiser l'effet de la perturbation de la variation de la pente ($\Delta\alpha_t$).

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, un nouvel algorithme de recherche des chemins de la commande $u(t)$ a été proposé, à partir du modèle structurel qui décrit qualitativement les différentes relations liant les grandeurs physiques d'un véhicule électrique dans une route avec pente variable.

L'analyse structurelle est un outil très important dans les aspects de contrôle et de supervision (**Blanke,2006**). Dans ce chapitre, l'analyse structurelle est utilisée comme outil rapide qui donne le lien structurel entre les instruments utilisés durant la phase de conception. Ensuite, on recherche toutes les architectures d'instrumentations admissibles pour accéder à la grandeur physique inconnue à commander de la mission visée de concepteur, en se basant sur la recherche dans l'outil de l'arbre graphique.

Le critère de la qualité de commande est considéré en terme d'assurance d'une bonne robustesse aux incertitudes des mesures des instruments et aux perturbations environnementales (variation forte de la pente de la route), dès la phase de conception.

L'influence de la perturbation sur la QoC du système est due généralement à la pente et aux incertitudes des mesures issues des capteurs. La méthode prend en considération, un problème de conception via une petite information sur le comportement du système en route avec pente variable. Dans ce travail, nous avons évalué la qualité de commande de la mission de commande la vitesse $QoC_{v_{t+\delta t}}$ pour plusieurs architectures.

Chapitre 4

La conception d'architecture optimale du système C–C à base d'un algorithme de recherche sous bi-critères : le niveau de la tolérance aux pannes (fautes) NTP , le coût

4.1 Introduction

Ce chapitre s'intéresse à la conception de l'instrumentation d'un système contrôle–commande (C–C). Il propose une méthode qui vise à optimiser cette instrumentation sous un critère de coût et sous des contraintes de la tolérance aux pannes (fautes). Cette méthode s'appuie sur une modélisation structurelle décrivant qualitativement les différentes relations qui lient les grandeurs physiques du système. L'analyse de ce modèle permet d'obtenir les différents chemins permettant d'estimer les grandeurs physiques inconnues à partir des mesures des capteurs et actionneurs. Le Niveau de Tolérance aux Pannes (NTP) donne le nombre minimal de défaillances que le système doit pouvoir supporter ; fixer le NTP d'une grandeur physique revient à fixer le nombre minimum de pannes. La phase finale d'optimisation consiste à déterminer l'instrumentation qui à moindre coût permet de tolérer le nombre imposé de pannes.

Les principales contributions de ce chapitre sont :

- l'application de l'algorithme de recherche pour trouver tous les chemins menant à la variable de commande $u(t)$ du système à partir des mesures des capteurs et des dernières commandes des actionneurs et d'autres variables physiques du système étudié.
- La formalisation de la phase d'optimisation qui consiste à déterminer l'instrumentation qui, à moindre coût, permet de tolérer le nombre imposé de défaillances. L'application retenue est celle d'une mission de contrôle de la vitesse d'un véhicule électrique.

4.2 Concept sur la conception d'un système C–C

L'instrumentation d'un système C–C est composée de capteurs et d'actionneurs, unités de traitement, qui permettent d'effectuer des missions spécifiques. Ces missions ne sont pas limitées au contrôle du processus physique par rapport à certaines spécifications, mais incluent également les activités de supervision ainsi que le diagnostic.

Le système de C–C peut être modélisé par un ensemble des variables physiques liées par un ensemble des contraintes, c'est à dire, un ensemble des relations algébriques entre ces variables. La modélisation structurelle représente l'interaction qualitative entre ces variables sans prendre en compte la forme particulière des contraintes, malgré le manque d'information de ce modèle.

4.3 Conception d'un système d'instrumentation tolérant aux fautes

Dans la référence (Meguetta,2013 b) la fonction de niveau de tolérance aux fautes (pannes) *NTP* permet de fixer un nombre minimal de composants défectueux entraînant l'incapacité du système à accomplir la mission considérée du système C–C.

Plus précisément, cette approche de conception se décompose en deux étapes. La première descriptive consiste en une modélisation du système et en une spécification des modes de fonctionnement du système étudié, du niveau associé de tolérance aux fautes et du coût des différents instruments potentiellement implantables sur le système. La seconde étape informatisable revient à rechercher différentes façons d'obtenir les grandeurs requises à partir de la modélisation structurelle, à construire le problème d'optimisation intégrant la spécification des niveaux de tolérance aux pannes et le critère de coût financier et à résoudre ce problème pour obtenir des architectures répondant aux spécifications.

La deuxième démarche de cette méthode de conception nécessite d'évaluer *NTP*. Dans ce contexte, le concept de (*NTP*) permet d'évaluer la sûreté de fonctionnement du système d'instrumentation. Pour chaque mission du système de contrôle–commande, la fonction de *NTP* exprime le nombre minimal de fautes et pannes de composants entraînant l'incapacité du système à accomplir la mission visée par concepteur.

De façon restrictive, le niveau de tolérance aux pannes se quantifie grâce à une fonction nommée $NTP(q)$. Cette fonction $NTP(q)$ appliquée à une grandeur physique q évalue ainsi le niveau de tolérance aux pannes vis-à-vis de sa capacité à la mesurer. Elle possède les propriétés suivantes (Meguetta,2013 b) :

- Si une grandeur q_i peut être estimée à partir des grandeurs q_j et q_k , on obtient :

$$\begin{aligned} NTP(q_i) &= NTP(q_j \wedge q_k) \\ &= \min(NTP(q_j), NTP(q_k)) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Cette relation qui caractérise que parmi, les grandeurs nécessaires pour ef-

fectuer l'estimation, celle ayant le plus faible niveau de tolérance aux pannes fixe le niveau de la grandeur recherchée.

- Si une grandeur q_i peut être estimée à partir de la grandeur q_j ou de q_k (sous une hypothèse d'indépendance de q_j et q_k), on obtient :

$$\begin{aligned} NTP(q_i) &= NTP(q_j \vee q_k) \\ &= NTP(q_j) + NTP(q_k) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Cette relation qui caractérise que, s'il existe plusieurs façons d'estimer une grandeur recherchée, c'est la somme de leur niveau de tolérance aux pannes qui fixe celui de la grandeur recherchée.

- Si la grandeur q peut être directement mesurée par des capteurs ou des actionneurs, on obtient :

$$NTP(q) = N_{\text{Capteur, Actionneur}} \quad (4.3)$$

Où $N_{\text{Capteur, Actionneur}}$ est le nombre de capteurs ou d'actionneurs en redondance implantés au sein du système C–C pour mesurer q ou agir sur q . Cette relation caractérise que pour une grandeur mesurée ou à contrôlé, son niveau de tolérance aux pannes est égal au nombre de capteurs ou actionneurs en redondance. Ainsi, avec un unique capteur, il suffit d'une seule défaillance pour que la mesure ne soit plus disponible ; avec deux capteurs, il faudra deux défaillances, etc.

4.4 Exemple d'application

Dans les systèmes complexes, il existe de multiple modes de fonctionnement et plusieurs états de comportement. A cette raison, nous utilisons l'outil de modélisation structurelle qui peut étudier des relations spécifiques associées aux positions particulières des capteurs et actionneurs dans ces modes de fonctionnement (Conrard,2009 b).

On considère le système à deux vannes représenté dans la figure 4.1, avec la définition de ses paramètres :

- Q_1, Q_2 et Q_{sortie} : débits dans les conduites,
- Cv_1, Cv_2 : coefficients d'ouverture des vannes V_1 et V_2 ,
- D_1, D_2 et D_{sortie} : mesures des débits,
- $Etat_{V_1}$ et $Etat_{V_2}$: états (ouvert ou fermé) des vannes

La matrice d'incidence structurelle du système à deux vannes est représentée dans la table 4.1. Les 2 dernières relations structurelles correspondent aux cas où les vannes V_1 et V_2 sont fermées. Dans ces deux cas, les coefficients d'ouverture respectifs sont connus et égaux à 0.

4.4.1 Analyse structurelle

Un avantage de la modélisation structurelle est de pouvoir établir de façon exhaustive, les différents ensembles de mesures (grandeurs connues) et les contraintes associées, qui permettent d'estimer chaque grandeur physique inconnue. Cette recherche exhaustive se fait par scrutation des différents chemins dans le graphe structurel

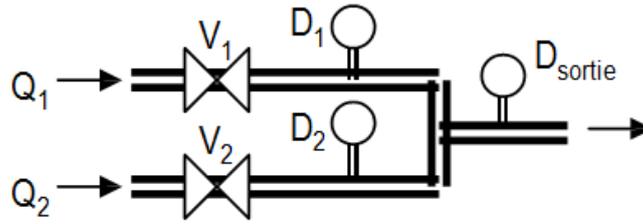


FIGURE. 4.1 – Système à deux vannes

TABLE. 4.1 – la matrice d'incidence

Relation	Grandeurs physiques					Modes de fonctionnement		Valeurs des capteurs		
	Q ₁	Q ₂	Q _{sortie}	C _{V1}	C _{V2}	Etat_V1	Etat_V2	D ₁	D ₂	D _{sortie}
1	1	1	1							
2	1			1						
3		1			1					
4	1							1		
5		1							1	
6			1							1
7				1		fermée				
8					1		fermée			

partant des variables connues et aboutissant à la variable inconnue considérée. Le mode de fonctionnement peut être précisé et permet d'intégrer dans l'algorithme de recherche, les relations particulières associées.

L'analyse structurelle de la matrice d'incidence fournit que le débit Q_1 peut être déterminé :

- directement par D_1 en utilisant la relation 4 mentionnée dans la table de la matrice d'incidence,
- indirectement par D_2 et $D_{sorties}$, en utilisant les relations 5 et 6 pour estimer Q_2 et Q_{sortie} , puis en utilisant la relation 1 pour déduire Q_1 ,
- sans aucune mesure, dans le cas d'un mode de fonctionnement où la vanne V_1 est fermée : Puisque C_{V1} est connu (relation 7) Q_1 est également connu en utilisant la relation 2
- directement par D_1 ou $D_{sorties}$, dans le cas d'un mode de fonctionnement où la vanne V_2 est fermée : Puisque C_{V2} est connu, Q_2 est indirectement connu (relations 8 et 3), Q_1 est déterminé en utilisant les relations 1 et 6 ou 4.

Ainsi, pour chaque mode de fonctionnement, différents chemins de calculs peuvent être utilisés et sont décrits par les relations suivantes, exprimant les variables requises pour l'estimation de Q_1 :

- $Q_1 \Leftarrow D_1 \vee (D_2 \wedge D_{sortie})$, quel que soit le mode de fonctionnement,
- $Q_1/V_{1\text{fermée}} \Leftarrow \emptyset$, pour le cas où la vanne V_1 est fermée,
- $Q_1/V_{2\text{fermée}} \Leftarrow D_1 \vee D_{sortie}$, pour le cas où la vanne V_2 est fermée

4.4.2 Les propriétés du niveau de tolérance aux pannes :

Le niveau de tolérance aux pannes pour chaque grandeur inconnue peut être évalué en fonction de l'instrumentation du système étudié. Cette expression sera utilisée pour formaliser le problème d'optimisation. Ainsi, en reprenant l'exemple précédent du système à deux vannes :

$$\begin{aligned} NTP(Q1) &= NTP(D_1 \vee (D_2 \wedge D_{sortie})) \\ &= NTP((D_1 \vee D_2) \wedge (D_1 \vee D_{sortie})) \\ &= \min(NTP(D_1 \vee D_2), NTP(D_1 \vee D_{sortie})) \\ &= \min(NTP(D_1) + NTP(D_2), NTP(D_1) + NTP(D_{sortie})) \\ &= \min(N_{D_1} + N_{D_2}, N_{D_1} + N_{D_{sortie}}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

4.5 Formalisation et résolution du problème d'optimisation

4.5.1 Spécification des contraintes de tolérance aux pannes

La modélisation structurelle permet de décrire un système C–C et de déterminer pour chaque grandeur inconnue ou à contrôler, un niveau de tolérance aux pannes selon le nombre d'instruments (capteur et actionneurs, unité de traitement) implantés dans le système considéré.

Lorsqu'il s'agit de concevoir un contrôle– commande C–C, l'objectif est de déterminer l'instrumentation qui possède un coût économique minimal et assure un niveau de sûreté de fonctionnement requis. Ce niveau fixé en niveau de tolérance aux pannes qui doit être spécifié pour chaque mission ou tâche du système C–C à concevoir, et fixé pour chaque grandeur physique et chaque actionneur requis pour l'accomplissement de la mission considérée. La fonction NTP (Niveau de Tolérance aux pannes) sert à fixer ce seuil. Si une grandeur q est requise par une mission k dont le niveau de tolérance est fixé à la valeur n_k , la contrainte correspondante est la suivante :

$$NTP(mission) \geq n_k \Rightarrow NTP(q) \geq n_k \quad (4.5)$$

Pour un système C–C, un ensemble des contraintes fixera les niveaux de sûreté de fonctionnement imposés par le concepteur. Ce système peut être transposé en contraintes sur le nombre d'instruments nécessaires.

4.5.2 Construction du problème d'optimisation

Le résultat du problème d'optimisation est composé par deux parties. la première est relative aux contraintes de tolérance aux pannes à partir de l'analyse structurelle et les propriétés de la fonction NTP comme illustré précédemment.

Pour chaque mission k , on détermine n_k :

$$\begin{cases} NTP(q_1) \geq n_k \\ \dots \\ NTP(q_i) \geq n_k \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} N_{q_1} \geq n_k \\ N_{q_i} \geq n_k \\ \dots \geq n_k \end{cases} \quad (4.6)$$

La deuxième partie de problème est relative au critère du coût, avec l'hypothèse que le coût de l'ensemble de l'instrumentation est directement lié aux coûts individuels de chaque type et nombre de capteurs et actionneurs, le critère consiste à chercher le minimum du coût comme le suivant :

On a q_i architectures concernées à la réalisation de la mission de contrôle d'une grandeur physique durant la phase de conception, avec $i = 1 : m$.

Pour chaque architecture q_i , on a C_{qj} composants, où K_i est le nombre de composants dans l'architecture q_i , avec : $j = 1 : K_i$.

$$Min_i(\sum_1^j C_{qj}) = Min_{1:m}(\sum_1^{K_i} C_{qj}) \quad (4.7)$$

4.5.3 Résolution du problème d'optimisation

Finalement, pour $i = 1 : K$ le problème d'optimisation est le suivant :

$$\begin{cases} Min(\sum_1^K C_{q_i}) \\ NTP(q_1) \geq n_k \\ \dots \\ NTP(q_i) \geq n_k \end{cases} \quad (4.8)$$

Il s'agit là d'une forme relativement classique de problème d'optimisation (**Charon, 1996**). Pour des systèmes de taille moyenne (jusqu'à une centaine de points d'instrumentation), ce problème peut être résolu de façon exacte par les moyens informatiques actuels. Un algorithme de type "Branch Bound" peut être utilisé et permet de scruter l'ensemble des combinaisons possibles pour ne retenir que la meilleure. L'intérêt de cet algorithme est de ne pas envisager toutes les solutions mais uniquement celles pouvant être optimales. Différentes techniques permettent d'améliorer sa rapidité telle que celle qui consiste à étudier les alternatives par ordre de coût croissant ou à décomposer le problème en plusieurs lorsque des groupes de variables sont indépendants.

Pour de plus gros systèmes, l'utilisation d'un algorithme d'optimisation stochastique tel qu'un algorithme génétique permet la résolution du problème et fournit un résultat industriellement utile, même si ce type d'algorithme ne peut assurer qu'il s'agit de la solution optimale. Par ailleurs, on notera que la forme du problème se prête bien à ce type d'algorithme puisqu'une solution peut être représentée par un vecteur où chaque élément correspond à un point d'instrumentation et sa valeur au nombre

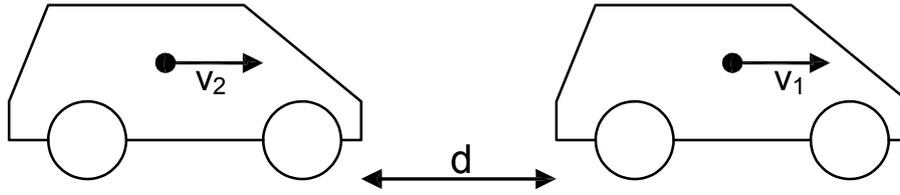


FIGURE. 4.2 – Système de deux véhicules

d'instruments (capteurs ou actionneurs) en redondance retenus pour ce point.

Le résultat final aboutit à la meilleure instrumentation qui, à coût minimal, respecte les contraintes de tolérances aux pannes (fautes) en fonction de NTP imposés par le concepteur.

4.6 Exemple d'illustration de l'approche proposée

4.6.1 Description générale

Le système considéré est composé de deux véhicules électriques (**Conrard,2011**) comme illustré dans la figure 4.2. Le premier, le dirigeant, est conduit manuellement alors que la mission de deuxième est de suivre le premier véhicule avec une distance donnée d .

Le problème de conception consiste à déterminer les capteurs et les actionneurs et leurs redondances à implémenter pour obtenir un système tolérant aux pannes. Chaque véhicule est supposé être autonome, mais l'information peut être échangée entre eux grâce à une communication sans fil. Les instruments qui sont disponibles pour chaque véhicule sont :

- Moteur électrique, pour la propulsion des véhicules
- Télémètre pour mesurer la distance entre deux véhicules.
- Le codeur à roue, pour mesurer la vitesse.
- Le Global Positioning System *GPS* pour mesurer la position.

Nous considérons les variables suivantes :

- p_i : la mesure issue de GPS i ,
- s_i : la mesure donnée par l'encodeur placé dans la roue i ,
- d_i : la mesure de distance entre les deux véhicules, issue de Télémètre i
- u_i : le signal de commande fourni par le moteur.
- x_i : la position du véhicule i
- v_i : la vitesse du véhicule i
- a_i : l'accélération du véhicule i

La matrice d'incidence qui représente les relations entre les variables pour un seul véhicule est donnée dans le tableau 6.2.

En ce qui concerne le train de deux véhicules, des contraintes supplémentaires sont ajoutées à la matrice d'incidence 4.3; tout en exprimant la distance entre les deux véhicules par rapport à la position relative des deux voitures.

Par la suite de cette étude de conception, différents modes de fonctionnement sont considérés par rapport à la distance entre les véhicules et à l'utilisation d'une in-

TABLE. 4.2 – Matrice d’incidence pour un seul véhicule

capteurs		actionneur	variables physiques		
p	s	u	x	v	a
1			1		
	1			1	
		1			1
			-1	1	
				-1	1

TABLE. 4.3 – Les contraintes sur la distance entre les véhicules

capteurs		variables physiques		
d_1	d_2	d	x_1	x_2
1		1		
	1	1		
		1	1	1

formation issue de *GPS*. La distance entre les véhicules peut être trop large et hors de portée pour le télémètre. Une variable *dist* est ajoutée. Elle prend la valeur *N* lorsque la distance entre véhicules est mesurable par le télémètre. Les véhicules peuvent être utilisés à l’intérieur ou à l’extérieur. Le *GPS* donne une mesure que dans le cas *outdoor* où les signaux de satellites ne sont pas perturbés. Une variable qualitative *env* est ajoutée dans le modèle structurel et prend la valeur *O* lorsque le véhicule roule à l’extérieur. En conséquence, les contraintes qui représentent les modes de fonctionnement sont données dans le tableau 4.4.

TABLE. 4.4 – Matrice d’incidence pour différents modes de fonctionnement

capteurs				variables physiques			mode	
p_1	p_2	d_1	d_2	x_1	x_2	d	<i>env</i>	<i>dist</i>
		1				1		N
			1			1		N
1				1			O	
	1				1		O	

4.6.2 L’analyse structurelle

La matrice d’incidence globale pour l’ensemble d’instrumentation du système est donnée dans la table 4.5.

A partir de cette matrice d’incidence, les différents chemins pour accéder aux variables à contrôler ou estimer peuvent être élaborés. Plus particulièrement, la distance entre les véhicules peut être évaluée par directement avec les mesures d_1 ou d_2 ; fournie par le télémètre ou indirectement par une estimation en utilisant la relation entre la mesures (p_1 ou p_2) de chaque *GPS*. Par conséquent, on obtient :

$$d_1 \vee d_2 \vee (p_1 \wedge p_2) \Rightarrow d$$

TABLE. 4.5 – Matrice d’incidence pour le système global de deux véhicules

p_1	s_2	u_1	x_1	v_1	a_1	p_2	s_2	u_2	x_2	v_2	a_2	d	d_1	d_2	env	$dist$
1			1													O
	1			1												
		1			1											
			-1	1												
				-1	1											
						1			1							O
							1			1						
								1			1					
									-1	1						
										-1	1					
			1									1				
												1	1			N
												1		1		N

De la même manière, la vitesse du premier véhicule peut être estimée grâce à une mesure locale par le capteur de l’encodeur ou le *GPS* (P_1 ou s_1), ou grâce à une relation entre la mesure de distance (d_1 ou d_2) et la position du second véhicule p_2 .

$$p_1 \vee s_1 \vee (d_1 \wedge p_2) \vee (d_2 \wedge p_2) \Rightarrow v_1$$

Cependant, ces façons d’estimer la grandeur physique ne sont valables que lorsque toutes les contraintes sont satisfaites et disponibles dans le mode de fonctionnement associé. Par conséquent, le nombre de façons est réduit en fonction de l’état de modes ; ici, ces modes sont l’environnement : intérieur (Indoor) ou extérieur (Outdoor) et la distance entre les véhicules (Near ou Far).

4.6.3 Résultat de l’optimisation

Pour cet exemple, nous proposons d’utiliser les contraintes concernant le niveau de tolérance de panne :

Le système doit être tolérant à :

- une défaillance si la distance entre les véhicules est trop grande pour être mesurable par le télémètre.
- deux défaillances lorsque la distance entre les véhicules est petite.

La vitesse du premier véhicule est contrôlée en fonction d’une valeur de consigne donnée externe, tandis que le second suit la première voiture par un maintien d’une distance donnée entre eux. Par conséquent, le système de contrôle doit mesurer et contrôler les variables d et v_1 . Les contraintes correspondantes sont les suivantes, en fonction du niveau de tolérance de fautes choisi :

$$NTP(d) > 1$$

$$NTP(v_1) > 1$$

$$NTP(d)_{dist=Near} > 2$$

$$NTP(v_1)_{dist=Near} > 2$$

Les coûts¹ choisis arbitrairement pour les capteurs et actionneurs sont :

- un coût de 3 pour un moteur
- un coût de 2 pour capteur complexe (GPS, télémètre)
- un coût de 1 pour simple capteur (encodeur)

Le résultat du problème d’optimisation est un coût global de 28 avec l’architecture suivante :

- 3 moteurs par véhicule,
- 2 GPS par véhicule,
- 1 télémètre pour le véhicule suiveur.

En effet, la contrainte d’être tolérant à 2 défaillances implique que 3 moteurs sont nécessaires pour chaque véhicule. En outre, lorsque les véhicules sont éloignés, les 2 *GPS* de chaque véhicule assurent que le système est tolérant à une défaillance unique, tandis que, quand ils sont près, un capteur télémétrique supplémentaire complète l’ensemble d’instrumentation et assure que deux défaillances de composants n’impliquent pas la panne du système total.

Si nous réduisons la spécification du niveau de tolérance de panne par un, l’architecture obtenue présente un coût de 18 et est constituée par :

- 2 moteurs par véhicule,
- 1 GPS par véhicule,
- 1 télémètre pour le véhicule suiveur.

4.7 Résultats de la conception bi-critères ((*NTP*), coût) sur le véhicule électrique

4.7.1 Description de processus

Nous considérons ici une partie de modèle structurel du véhicule électrique (**Meguetta, 2012**). Les instruments disponibles pour ce véhicule sont :

- Moteur électrique (*U*).
- Capteur de vitesse (*Cv*).
- *GPS*, pour mesurer la position.
- Inclinomètre (*I*), pour mesurer l’angle de la pente.
- Chronomètre (*CH*), pour mesurer le temps de descente de route avec pente.

Nous rappelons quelques variables utilisées :

a_t est l’accélération du véhicule, v_t est la vitesse du véhicule, x_t est la position du véhicule, u_t est signal de commande de moteur électrique, et α_t est la pente de la route, I_t est la mesure donnée par l’inclinomètre, cv_t est la mesure donnée par le capteur de vitesse.

1. Les coûts sont donnés dans une unité de mesure (euros, dollars, ..) que l’on ne précise pas volontairement. Pour simplifier la présentation, l’unité ne sera pas spécifiée pour chaque coût

4.7.2 L'analyse structurelle

Remarque : l'étude de la tolérance aux pannes (*NTP*) sera expliquée sur une architecture d'instrumentation amissible *archi₂* qui est illustrée dans le troisième chapitre de cette thèse. Ici, on étudie la tolérance aux pannes des missions de contrôle ou commande de la vitesse et l'accélération du véhicule électrique.

On expliquera notre étude de la fonction de la tolérance aux pannes sur l'architecture d'instrumentation admissible 2, qui est montrée dans la figure 4.3.

Nous suivons le même principe d'étude de *NTP* sur les autres architectures d'instrumentations admissibles (1,3,4,5), comme montré dans les figures 4.4, 4.5, 4.6 et 4.7.

Nous utilisons l'analyse structurelle sur l'arbre graphique de l'architecture d'instrumentation admissible (*archi₂*). Afin d'étudier le niveau de tolérance aux pannes (*NTP*) de leurs instruments dans la figure 4.3.

A partir de cette représentation graphique, nous trouvons différents chemins pour accéder aux variables à contrôler ou commander. La vitesse du véhicule électrique peut être trouvée en utilisant la relation entre la mesure de la pente α_t et la vitesse v_t et la commande électrique u_t . Par conséquent, nous obtenons (**Megatta,2012**) :

$$(\alpha_t \wedge u_t \wedge v_t) \Rightarrow v_{t+\delta t} \quad (4.9)$$

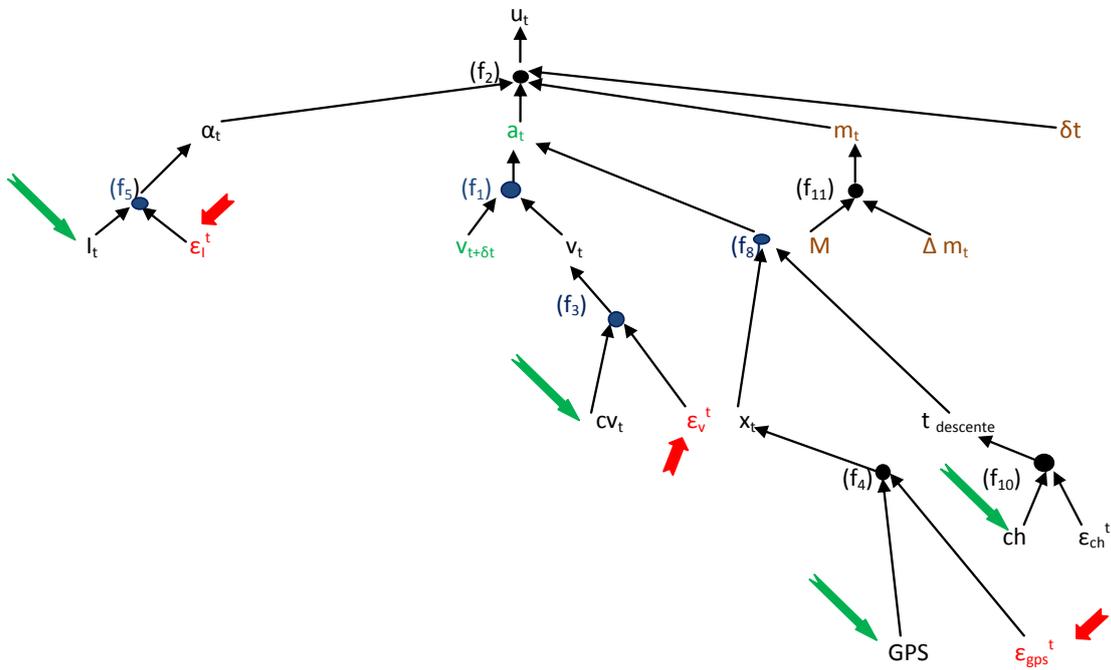
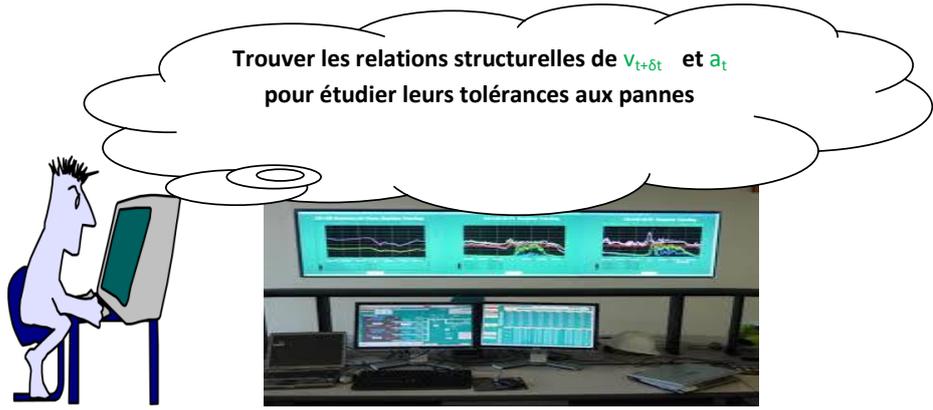
En appliquant le même principe de la méthode précédente, l'accélération du véhicule peut être estimée : en utilisant la relation entre u_t et α_t , ou bien grâce à la relation entre la position mesurée (x) et le temps de descente ($t_{descente}$) valable dans le cas où la pente est constante et, aussi la relation entre deux mesures successives de la vitesse du véhicule v_t .

$$(u_t \wedge \alpha_t) \vee (x_t \wedge t_{descent}) \vee (v_{t+\delta t} \wedge v_t) \Rightarrow a_t \quad (4.10)$$

Grâce aux propriétés de la fonction *NTP*, le niveau de tolérance aux pannes pour chaque grandeur inconnue ou grandeur physique à commander—contrôler peut être évalué en fonction de l'instrumentation du système. Cette expression sera utilisée pour formaliser le problème d'optimisation. Par exemple, la vitesse à l'instant futur $v_{t+\delta t}$ peut être estimée à partir des mesures α_t et de u_t et v_t . Son *NTP* est obtenu par les relations suivantes :

Premièrement, le niveau de tolérance aux pannes pour la vitesse $v_{t+\delta t}$ est le suivant :

$$\begin{aligned} NTP(v_{t+\delta t}) &= NTP(\alpha_t \wedge u_t \wedge v_t) \\ &= \min(NTP(\alpha_t), NTP(u_t), NTP(v_t)) \\ &= \min(N_{\alpha_t}, N_{u_t}, N_{v_t}) \end{aligned} \quad (4.11)$$

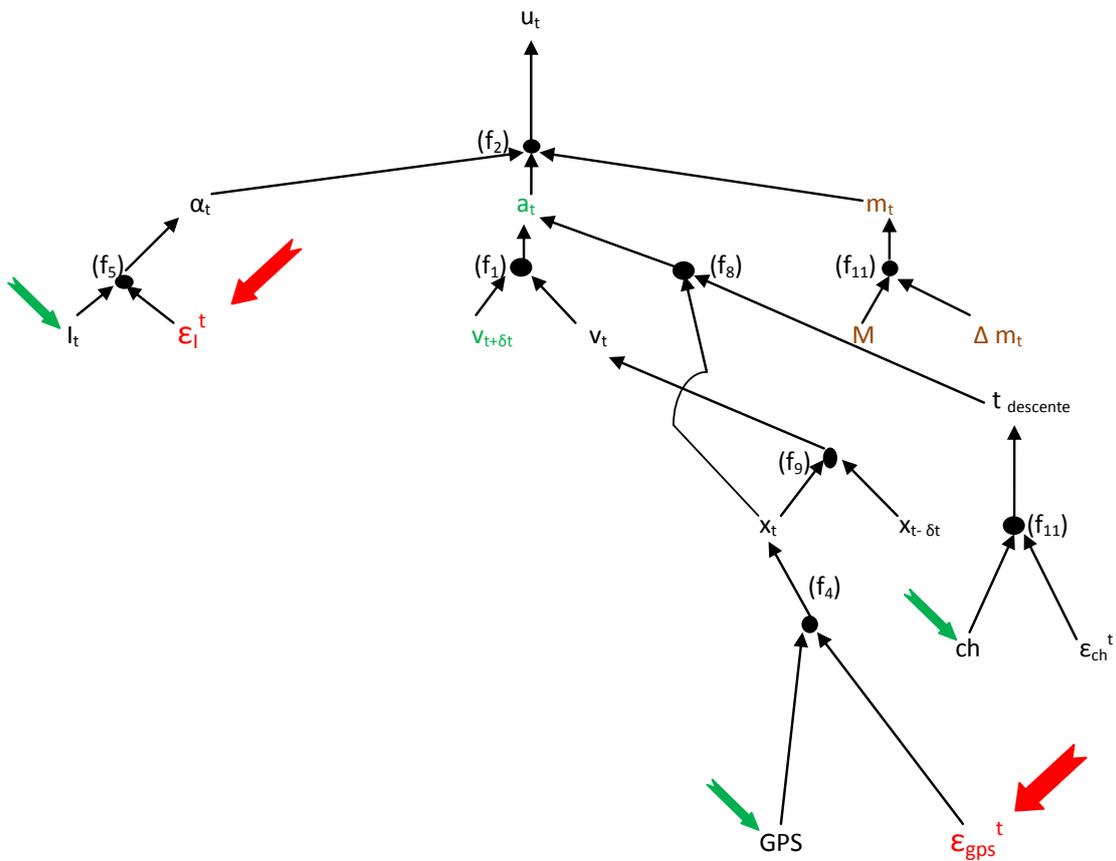


→ Tolérance aux pannes liées aux instruments

FIGURE. 4.3 – Etude de la tolérance aux pannes sur l'architecture admissible 2

Deuxièmement, pour l'accélération a_t :

$$\begin{aligned}
 NTP(a_t) &= NTP((u_t \wedge \alpha_t) \vee (x_t \wedge t_{descente}) \vee (v_{t+\delta t} \wedge v_t)) \\
 &= \min(NTP(u_t), NTP(\alpha_t)) \vee \min(NTP(x_t), NTP(t_{descente})) \\
 &\quad \vee \min(NTP(v_{t+\delta t}), NTP(v_t)) \\
 &= \min(NTP(u_t), NTP(\alpha_t)) + \min(NTP(x_t), NTP(t_{descente})) \\
 &\quad + \min(NTP(v_{t+\delta t}), NTP(v_t)) \\
 &= \min(N_{u_t}, N_{\alpha_t}) + \min(N_{x_t}, N_{t_{descente}}) \\
 &\quad + \min(N_{v_{t+\delta t}}, N_{v_t})
 \end{aligned}$$



→ Tolérance aux pannes liées aux instruments

FIGURE. 4.5 – Etude de la tolérance aux pannes sur l'architecture admissible 3

Nous expliquons la procédure de l'optimisation sur le cas d'architecture admissible *archi*₂. Le principe de cette dernière sera le même pour les autres architectures d'instrumentation admissible (1, 3, 4, 5) pour réaliser les missions de commande ou

Trouver les relations structurelles de $v_{t+\delta t}$ et a_t pour étudier leurs tolérances

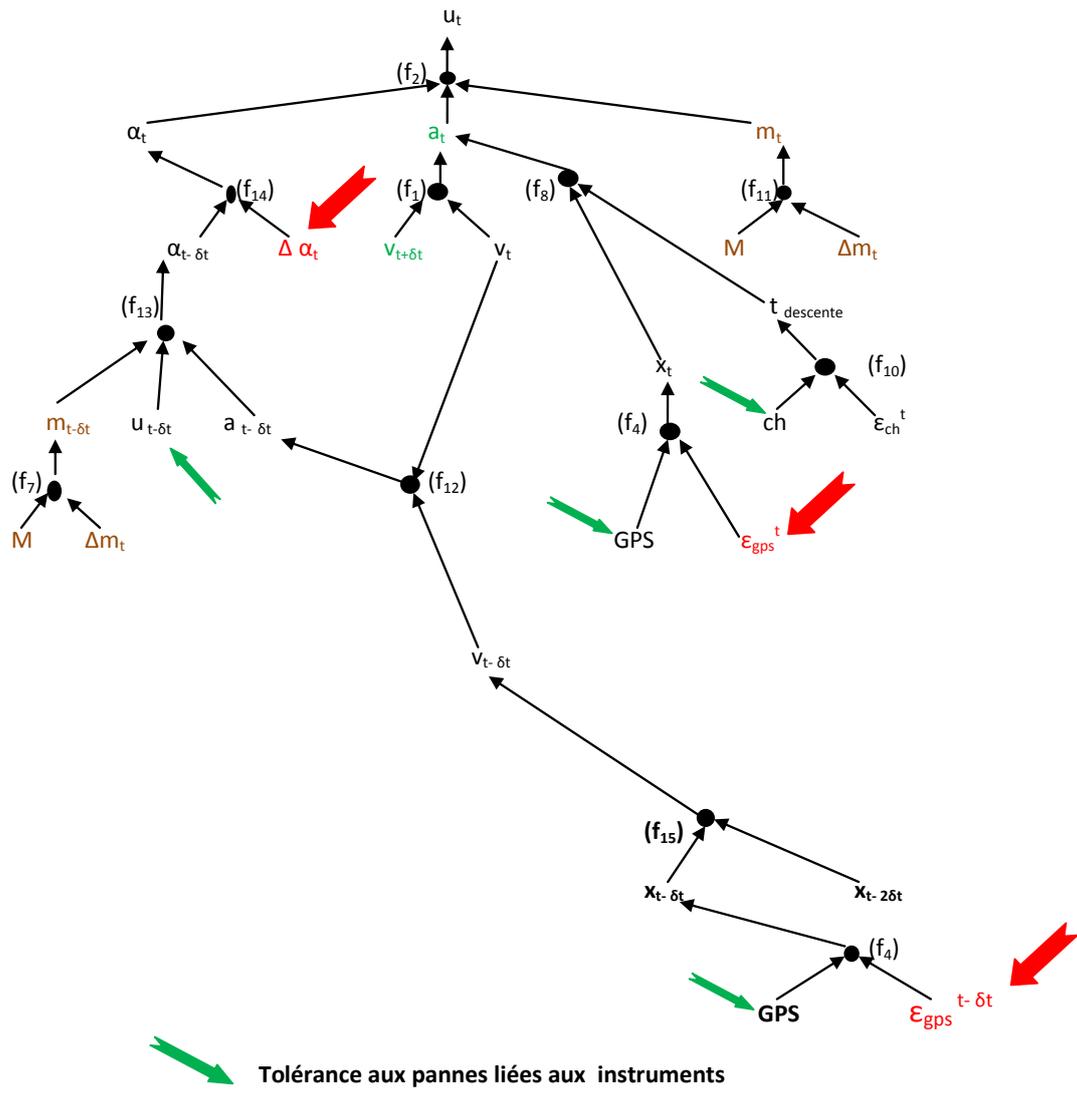


FIGURE. 4.6 – Etude de la tolérance aux pannes sur l'architecture admissible 4

contrôle la vitesse et l'accélération.

En appliquant le problème d'optimisation comme illustré dans l'équation 4.8 et la spécification du niveau de tolérance aux fautes NTP , le problème devient :

Trouver les relations structurelles de $v_{t+\delta t}$ et a_t pour étudier leurs tolérances

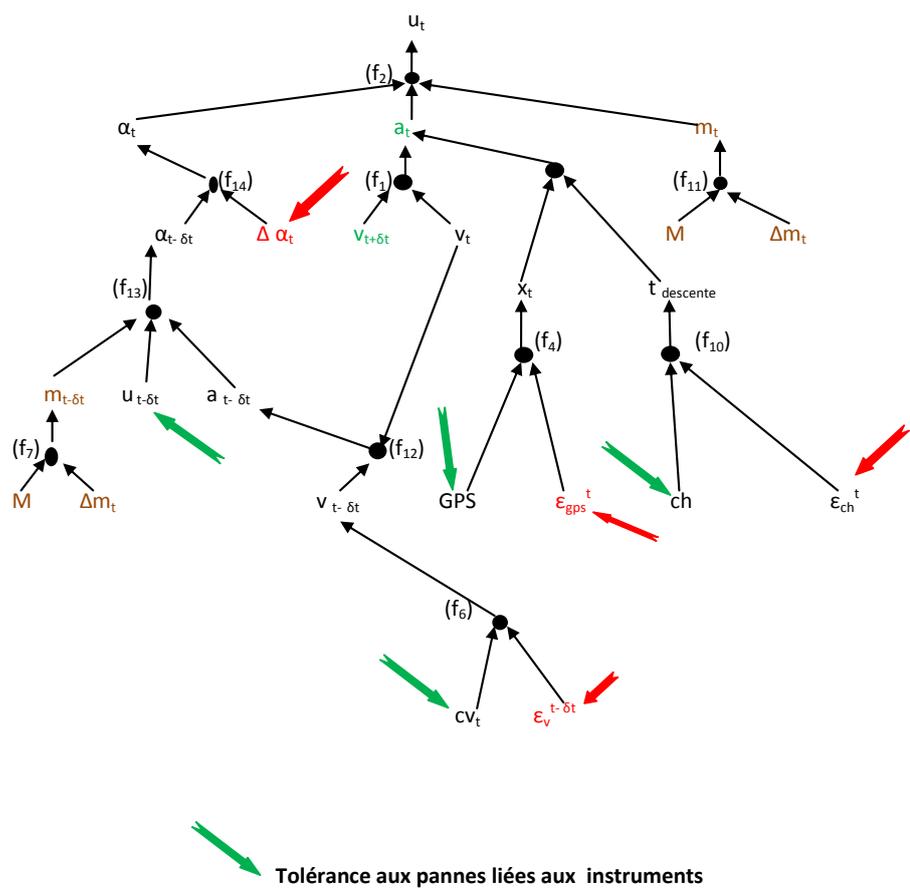


FIGURE. 4.7 – Etude de la tolérance aux pannes sur l'architecture admissible 5

Le problème d'optimisation pour le cas de pente de la route α_t est trop petite est le suivant :

$$\begin{cases} \min(C_{Cv} + C_I + C_U) \\ \min(N_{\alpha_t}, N_{u_t}, N_{v_t}) \geq n_1 \\ \min(N_{u_t}, N_{\alpha_t}) + \min(N_{x_t}, N_{t_{descent}}) + \min(N_{v_{t+\delta t}}, N_{v_t}) \geq n_1 \end{cases} \quad (4.13)$$

Le problème d'optimisation pour le cas de la pente de la route α_t est trop grande est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min}(C_{Cv} + C_I + C_U + C_{CH} + C_{GPS}) \\ \min(N_{\alpha_t}, N_{u_t}, N_{v_t}) \geq n_2 \\ \min(N_{u_t}, N_{\alpha_t}) + \min(N_{x_t}, N_{t_{descent}}) + \min(N_{v_{t+\delta t}}, N_{v_t}) \geq n_2 \end{array} \right. \quad (4.14)$$

La table 4.6 résume les résultats de calcul de niveau de tolérances aux pannes (*NTP*) pour les missions de contrôle ou commande de la vitesse et de l'accélération pour chaque architecture admissible ainsi que, leurs coût totaux. Avec les valeurs de niveau de tolérance aux fautes associées aux instruments disponibles dans les cinq architectures admissibles : C_v, I, U, GPS, CH :

$N_{Cv} = 3$ est le niveau de tolérance aux pannes (*NTP*) pour le capteur de vitesse,
 $N_I = 1$ est le *NTP* pour l'inclinomètre,
 $N_U = 2$ est le *NTP* pour le moteur électrique,
 $N_{CH} = 0$ car, le chronomètre *CH* n'est pas très important dans l'ensemble des instruments dans le véhicule électrique, alors ce composant n'a pas besoin de tolérance aux pannes,
 $N_{GSP} = 1$, le *GPS* doit être tolérant à une défaillance.

Remarque : Nous considérons que les niveaux de tolérances aux pannes (*NTP*) liés aux instruments redondants (redondance matérielle) dans les architectures admissibles ont les mêmes instruments aux différentes dates ($t, t - \delta t, t - 2\delta t, ..$) de mesures.

Nous choisissons arbitrairement les valeurs des coûts associées à chaque capteur et actionneur :

$C_U = 10$ pour le coût de moteur électrique,
 $C_{Cv} = 5$ est un coût pour capteur de vitesse,
 $C_I = 4$ pour le coût d'inclinomètre,
 $C_{GPS} = 7$ pour le coût de *GPS*,
 $C_{CH} = 1$ pour le coût de chronomètre.

La procédure d'optimisation a été appliquée sur les cinq différentes architectures d'instrumentations admissibles pour réaliser les deux missions : commande ou contrôle la vitesse $v_{t+\delta t}$ et l'accélération a_t . Alors, la meilleure solution qui satisfait les objectives de conception et à moindre coût, est celle de l'architecture admissible *archi₂* qui représente le choix optimal adéquat aux exigences relatives aux deux cas d'études : la pente de la route α_t est trop petite et grande.

Le résultat du problème d'optimisation est (*archi₂*) :

- **La mission de contrôle de la vitesse** $NTP(v_{t+\delta t})$ doit être tolérante à une défaillance. Le coût minimal de cette architecture d'instrumentation $C_{archi2} = 19$: un coût de 10 pour moteur électrique, un coût de 4 pour inclinomètre et un coût de 5 pour capteur de vitesse.
- **La mission de contrôle de l'accélération** $NTP(a_t)$ doit être tolérante à quatre défaillances. Le coût minimal de cette architecture d'instrumentation $C_{archi2} = 27$ un coût de 10 pour moteur électrique, un coût de 4 pour inclinomètre, un coût de 5 pour capteur de vitesse, un coût de 7 pour *GPS* et un coût de 1 pour chronomètre.

TABLE. 4.6 – Calculs de niveau de tolérance aux pannes pour chaque architecture d'instrumentation admissible et leurs coûts

Etude de tolérance aux pannes de $v_{t+\delta t}$ et a_t pour chaque architecture	Coût total pour chaque mission ($v_{t+\delta t}$ et a_t)
<p><u>Cas d'étude $archi_1$: $NTP_{v_{t+\delta t}} = 2$</u></p> $NTP_{v_{t+\delta t}} = \text{Min}(N_{Cv}, N_U)$ <p><u>$NTP_{a_t} = 5$</u></p> $NTP_{a_t} = \text{Min}(N_U, N_{Cv}) + \text{Min}(N_{GPS}, N_{CH}) + \text{Min}(N_{Cv})$	<p>Instruments disponibles dans $archi_1$ pour réaliser la mission de contrôle $v_{t+\delta t}$: 2 moteurs électriques et 3 capteurs de vitesse <u>Coût total $C_{v_{t+\delta t}} = 35$</u></p> <p>Instruments disponibles dans $archi_1$ pour réaliser la mission de contrôle a_t : 2 moteurs électriques, 3 capteurs de vitesse, 1 GPS et 1 chronomètre <u>Coût total $C_{a_t} = 43$</u></p>
<p><u>Cas d'étude $archi_2$: $NTP_{v_{t+\delta t}} = 1$</u></p> $NTP_{v_{t+\delta t}} = \text{Min}(N_{Cv}, N_U, N_I)$ <p><u>$NTP_{a_t} = 4$</u></p> $NTP_{a_t} = \text{Min}(N_U, N_I) + \text{Min}(N_{GPS}, N_{CH}) + \text{Min}(N_{Cv})$	<p>Instruments disponibles dans $archi_2$ pour réaliser la mission de contrôle $v_{t+\delta t}$: 1 moteur électrique, 1 capteur de vitesse et un inclinomètre <u>Coût total $C_{v_{t+\delta t}} = 19$</u></p> <p>Instruments disponibles dans $archi_2$ pour réaliser la mission de contrôle a_t : 1 moteur électrique, 1 capteur de vitesse, 1 GPS, 1 inclinomètre et 1 chronomètre <u>Coût total $C_{a_t} = 27$</u></p>
<p><u>Cas d'étude $archi_3$: $NTP_{v_{t+\delta t}} = 1$</u></p> $NTP_{v_{t+\delta t}} = \text{Min}(N_{GPS}, N_U, N_I)$ <p><u>$NTP_{a_t} = 2$</u></p> $NTP_{a_t} = \text{Min}(N_U, N_I) + \text{Min}(N_{GPS}, N_{CH}) + \text{Min}(N_{GPS})$	<p>Instruments disponibles dans $archi_3$ pour réaliser la mission de contrôle $v_{t+\delta t}$: 1 moteur électrique, 1 GPS et 1 inclinomètre <u>Coût total $C_{v_{t+\delta t}} = 21$</u></p> <p>Instruments disponibles dans $archi_3$ pour réaliser la mission de contrôle a_t : 1 moteur électrique, 1 inclinomètre, 2 GPS et 1 chronomètre <u>Coût total $C_{a_t} = 28$</u></p>
<p><u>Cas d'étude $archi_4$: $NTP_{v_{t+\delta t}} = 1$</u></p> $NTP_{v_{t+\delta t}} = \text{Min}(N_{GPS}, N_U)$ <p><u>$NTP_{a_t} = 2$</u></p> $NTP_{a_t} = \text{Min}(N_U, N_{GPS}) + \text{Min}(N_{GPS}, N_{CH}) + \text{Min}(N_{GPS})$	<p>Instruments disponibles dans $archi_4$ pour réaliser la mission de contrôle $v_{t+\delta t}$: 2 moteurs électriques et 1 GPS <u>Coût total $C_{v_{t+\delta t}} = 27$</u></p> <p>Instruments disponibles dans $archi_4$ pour réaliser la mission de contrôle a_t : 2 moteurs électriques, 3 GPS et 1 chronomètre <u>Coût total $C_{a_t} = 42$</u></p>
<p><u>Cas d'étude $archi_5$: $NTP_{v_{t+\delta t}} = 2$</u></p> $NTP_{v_{t+\delta t}} = \text{Min}(N_{Cv}, N_U)$ <p><u>$NTP_{a_t} = 5$</u></p> $NTP_{a_t} = \text{Min}(N_U, N_{Cv}) + \text{Min}(N_{GPS}, N_{CH}) + \text{Min}(N_{Cv})$	<p>Instruments disponibles dans $archi_5$ pour réaliser la mission de contrôle $v_{t+\delta t}$: 2 moteurs électriques et 2 capteurs de vitesse <u>Coût total $C_{v_{t+\delta t}} = 30$</u></p> <p>Instruments disponibles dans $archi_5$ pour réaliser la mission de contrôle a_t : 2 moteurs électriques, 2 capteurs de vitesse, 1 GPS et 1 chronomètre <u>Coût total $C_{a_t} = 38$</u></p>

4.8 Conclusion

Ce chapitre propose une approche de conception d'un système contrôle–commande bi–critère : la fonction du niveau de tolérance aux pannes (fautes), le critère du coût. En effet, il nécessite une base réduite de données, c'est–à–dire une matrice d'incidence construite en utilisant la modélisation structurelle et l'outil de l'arbre graphique, le coût des instruments mis en oeuvre (les coûts des capteurs et des actionneurs), et un ensemble de contraintes du niveau de tolérance aux pannes *NTP*. Après avoir résolu la phase de l'optimisation, l'approche de conception proposée consiste à choisir les instruments (capteurs, actionneurs) qui offrent le meilleur niveau de tolérance aux pannes à moindre coût pour les variables à contrôler ou à commander. Par conséquent, la capacité de tolérance aux pannes est présentée pour déterminer l'architecture optimale d'instrumentation qui permet d'effectuer la mission malgré une ou plusieurs défaillances des instruments.

Chapitre 5

Conception optimale d'architecture de système C–C sûre de fonctionnement sur la base d'une modélisation structurelle

5.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur la conception fiable de l'instrumentation du système de contrôle– commande C–C qui nécessite des méthodes précises pour évaluer efficacement le niveau de sûreté de fonctionnement. Le niveau de la fiabilité d'un système de contrôle ne dépend pas seulement de la nature des défaillances des composants qui peuvent se produire, mais également des liens structurels du système. Il existe de nombreux outils d'évaluation de la fiabilité comme : arbres de défaillance, graphes de Markov ou réseau de Petri Stochastique et l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (*AMDEC*).

La nouveauté de ce chapitre est d'évaluer la fiabilité à partir des liens structurels. Cette méthode est une évaluation quantitative et a pour but de déterminer la probabilité d'occurrence de mauvais fonctionnement du système. Il faut connaître le taux de défaillances des paramètres de sûreté de fonctionnement et selon la connaissance de l'effet de chaque défaillance d'un composant, la probabilité de chaque événement redouté peut être calculée.

Dans ce chapitre, une méthodologie complète pour concevoir des systèmes de contrôle–commande C–C fiables est présentée. L'aspect innovant de cette méthode est qu'elle prend en compte les liens structurels du système. Premièrement, cet outil permet de modéliser structurellement le système qui est en phase de conception et deuxièmement d'évaluer le niveau de fiabilité d'un ensemble d'architectures matérielles.

L'étude prend ainsi en compte la structure physique du système, c'est à dire les interactions entre les composants. Le système de commande de la vitesse puis celui de l'accélération d'un véhicule électrique sont utilisés en tant qu'exemples illustratifs.

La modélisation structurelle décrit qualitativement les différentes relations qui lient

les grandeurs physiques du système. L'analyse de ce modèle permet d'obtenir les différents chemins permettant d'accéder aux grandeurs physiques inconnues à partir des mesures des capteurs et des commandes des actionneurs. La sûreté de fonctionnement est considérée en termes d'évaluation de la fiabilité de la mission fixée par le concepteur en utilisant les liens structurels du système qui est en phase de conception. La phase finale d'optimisation consiste à déterminer l'instrumentation qui à moindre coût avec une fiabilité désirée pour la mission fixée (**Meguetta,2014 a**).

Dans ce chapitre, la première démarche pour l'approche de conception d'un système C-C consiste essentiellement à le modéliser en utilisant l'analyse structurelle. La deuxième démarche concerne la phase d'optimisation sous deux critères la sûreté de fonctionnement en termes de critère de fiabilité vis à vis d'une mission à accomplir et le critère de coût.

Après avoir définie une architecture matérielle globale du système, le concepteur évalue les caractéristiques de différents choix (coût, fiabilité..) avec la détermination des points faibles pendant la phase de conception.

Cette méthode détermine combien et quel type de capteur et d'actionneur pour constituer l'ensemble d'instrumentation. Le concepteur peut alors choisir la meilleure architecture d'instrumentation pour avoir un bon rapport entre la sûreté de fonctionnement – coût comme illustré dans la figure (5.1).

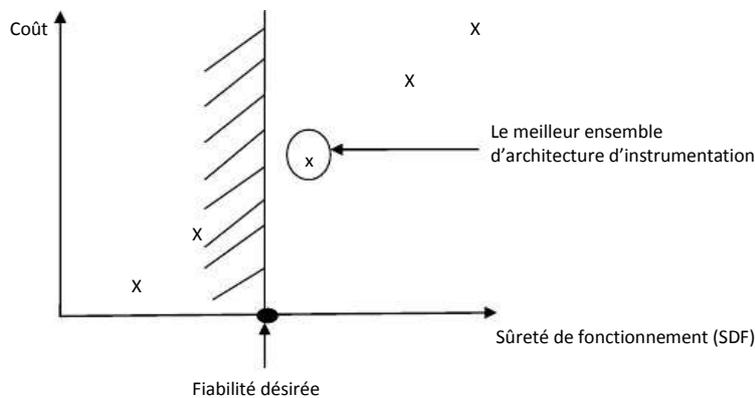


FIGURE. 5.1 – Le concept de l'approche de conception en utilisant les contraintes de sûreté de fonctionnement et le critère du coût pour un système de C-C

5.2 Contexte :

La principale entrave au bon fonctionnement d'un système C-C est la défaillance de son instrumentation, c'est-à-dire des capteurs ou des actionneurs qui le composent. Ainsi, pour qu'un tel système soit sûr de fonctionnement, il doit d'une part détecter les défaillances qui peuvent survenir et d'autre part adapter sa commande en conséquence. L'objectif des méthodes de conception d'un système C-C sûr de fonctionnement est de déterminer un ensemble des capteurs et actionneurs qui, à moindre coût, permettra au système de continuer à remplir certaines missions ou

services malgré la panne et la défaillance d'un nombre déterminé de ces composants.

L'étude de ces systèmes au travers d'un modèle structurel permet de déterminer certaines propriétés. En effet, les différents chemins (indirectement les relations) permettent d'accéder aux grandeurs physiques inconnues à partir de grandeurs connues comme les mesures des capteurs et les commandes des actionneurs. Cette problématique vise à apporter les contributions suivantes :

- La modélisation structurelle classique (**Blanke,2003**), (**Conrard,2009**) est étendue afin de représenter les spécificités des différents modes et états de fonctionnement du système. Les liens structurels du système étudié serviront pour l'évaluation de la fiabilité.
- Montrer l'intérêt de l'analyse structurelle afin de pouvoir établir les différents ensembles de mesures et de commande, exprimés sous la forme d'expressions booléennes, permettant d'estimer ou de contrôler chaque grandeur inconnue à mesurer ou à asservir.
- La sûreté de fonctionnement est considérée en termes d'évaluation de la fiabilité de la mission fixée par le concepteur en utilisant les liens structurels du système qui est en phase de conception. Au final on peut déterminer le temps probabiliste de bon fonctionnement.
- Déterminer l'architecture optimale d'instrumentation qui permet d'obtenir, à moindre coût, la fiabilité désirée pour la mission fixée par le concepteur.

5.3 Concepts généraux relatifs à la conception du système C–C fiable

Le concept général de la conception du système C–C fiable est divisé en différentes phases, comme montré dans la figure 5.2. :

- La première étape consiste à définir les objectifs et spécifications du système de commande–contrôle ; c'est à dire fixer la mission visée, dès la phase de conception, puis réaliser la modélisation structurelle du système qui décrit qualitativement les différentes relations liant les grandeurs physiques du système.
- L'étape suivante conduit au classement de l'ensemble des variables connues et inconnues en utilisant des mesures de capteurs et actionneurs, le mode et les états de système.
- Puis on détermine la relation booléenne de la mission grâce à l'analyse structurelle.
- Dans l'étape suivante, on évalue de manière quantitative la fiabilité de la mission grâce aux liens structurels de système en utilisant les critères de sûreté de fonctionnement.
- Enfin, la dernière étape permet de valider l'architecture optimale en utilisant le problème d'optimisation sous deux critères de sûreté de fonctionnement et de coût.

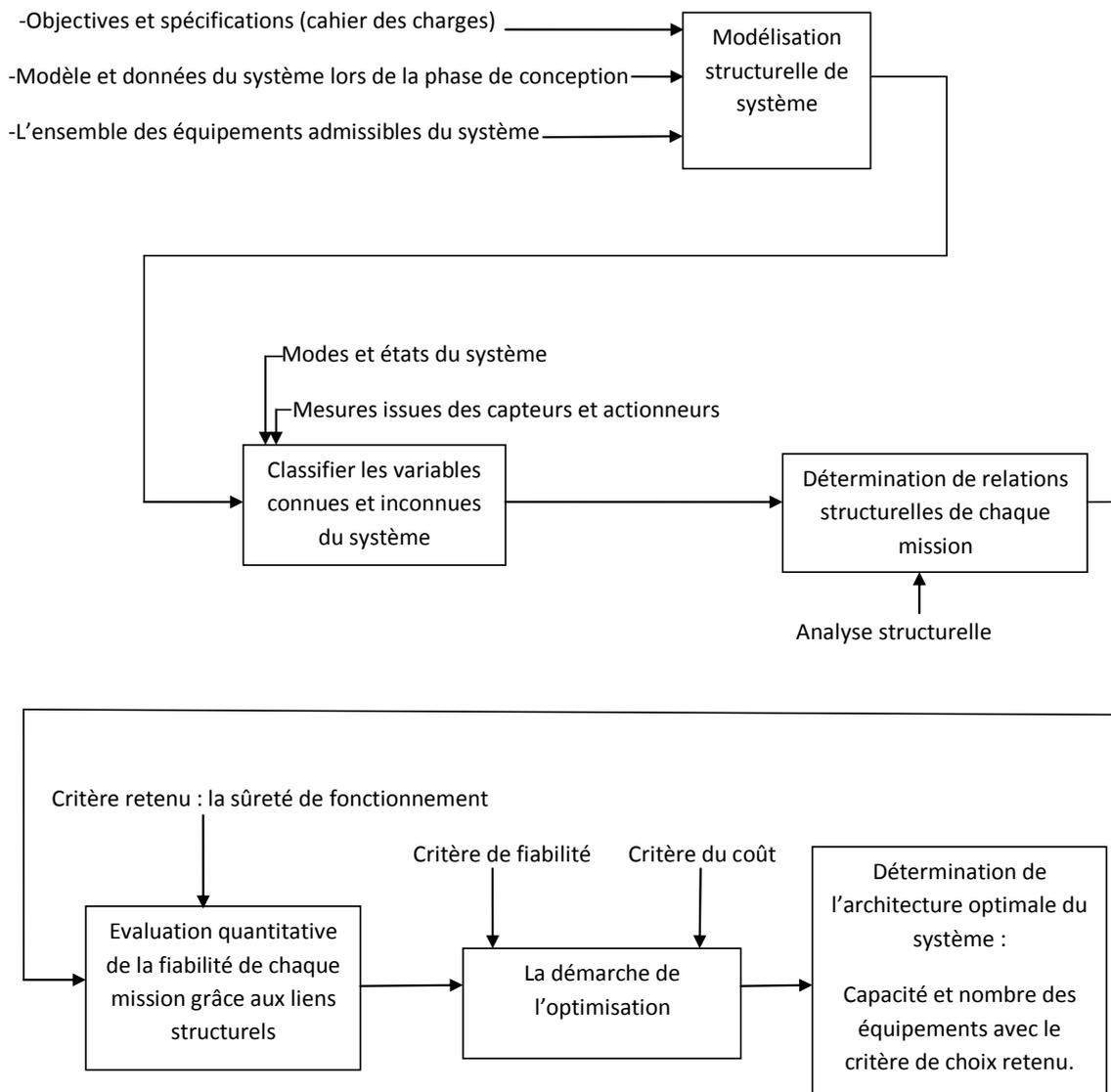


FIGURE. 5.2 – La démarche détaillée de la conception d'architecture de système sûr de fonctionnement

5.4 Méthodes d'évaluation de la fiabilité :

5.4.1 En utilisant le taux de défaillance :

L'évaluation des caractéristiques de sûreté de fonctionnement du système peut être effectuée par plusieurs méthodes. Beaucoup de livres et d'articles de recherche (**Kumamoto,1996**), (**Rausand,2004**), (**Dakil,2014**), (**Simon,2013**), (**Boukhobza,2014**) et de normes internationales dédiées à la fiabilité (**IEC,2003**), sont consacrés à ces méthodes : arbres de défaillance, diagrammes de fiabilité; ces méthodes statiques classiques sont axées sur une évaluation probabiliste des caractéristiques de sûreté de fonctionnement.

Dans ce chapitre, nous allons étudier le critère de fiabilité en utilisant le taux de défaillance; cette méthode est une évaluation quantitative et a pour but de déterminer la probabilité d'occurrence d'événements redoutés.

Il conviendra de connaître l'effet de chaque défaillance d'un composant implanté dans le système à concevoir ainsi que le taux de défaillance. On peut alors définir les caractéristiques de fiabilité grâce à la relation structurelle entre les composants du système de commande.

5.4.2 En utilisant les caractéristiques temporelles

Il existe des méthodes basées sur les réseaux de Pétri ou graphes de Markov qui visent à inclure les caractéristiques temporelles. Ces modèles peuvent intégrer différents taux de défaillances ou de transitions selon les états d'un système. Ils prennent en compte les états réparables des composants du système, et les dépendances temporelles entre les fonctions. Cependant, ces modèles ne sont souvent pas faciles à construire et à étudier. Ils ont besoin de méthodes mathématiques efficaces, et peuvent conduire à une explosion combinatoire de leurs états si elles ne sont pas correctement gérées (**Moncelet,1998**), (**Schoenig,2006**). L'idée de combiner les deux méthodes statiques et dynamiques pour résoudre les problèmes de construction et d'explosion combinatoire, a été étudiée dans un certain nombre des travaux de recherche dans la littérature, ainsi :

- Dugan dans la référence (**Dugan,2001**) a développé le concept des arbres de défaillance dynamiques. Cet arbre a la capacité de capturer des dépendances d'ordre dans les systèmes d'exploitation. Elle peut être évaluée par une combinaison de diagrammes de décision binaire, et des processus de Markov.
- Dans les références (**Bouissou,2004**), (**Bouissou,2003**) Bouissou a défini de nouvelles sémantiques pour arbres de défaillances augmentées avec un nouveau type de lien appelé un «déclencheur» en utilisant des processus de Markov. Ce nouveau formalisme est appelé "Boolean Logic Driven Markov Process" (*BDMP*). Ce formalisme permet de réduire l'explosion combinatoire des états lors de l'étude d'énormes systèmes.
- Dans la référence (**Cepin,2002**), Cepin et Mavko étendent un arbre de défaillance classique avec une "house" matrice des événements, et les dépendances de la fonction temporelle. La matrice des événements "house"

possède des connections entre les portes et les événements de l'arbre de défaillance. Elle représente également le fonctionnement du système, et de son environnement.

Ces méthodes permettent d'évaluer les caractéristiques de la sûreté de fonctionnement d'une architecture de composants d'un système existant. Notre objectif, qui est de concevoir un système de contrôle—commande en se basant sur les spécifications du cahier des charges de concepteur, l'architecture définitive du système n'est donc pas encore connue.

5.4.3 En utilisant le nombre de tolérance aux pannes

La méthode générale de conception concerne une évaluation précise des paramètres de sûreté de fonctionnement en termes de la valeur de la fiabilité. De cette manière, le concept du niveau de tolérance aux pannes (*NTP*) est proposé pour évaluer la fiabilité d'un système d'instrumentation ou de l'accomplissement d'une de ses missions. Pour une architecture matérielle donnée et pour une mission fixée par le concepteur, le *NTP* exprime le nombre minimal de composants de pannes qui empêchent la mission à accomplir.

Dans la référence (**Meguetta,2013 b**), les critères de sûreté de fonctionnement d'un système en phase de conception sont considérés par la fonction *NTP*, ils sont utilisés pour évaluer la fiabilité et déterminer le nombre de défaillances qui peuvent induire l'indisponibilité du système de contrôle— commande. Cette fonction *NTP* a des propriétés présentées dans le chapitre précédent.

Dans ce chapitre, nous considérons comme critère de sûreté de fonctionnement la fiabilité.

5.5 La démarche de conception d'un système contrôle — commande

Notre démarche de conception se compose en trois phases principales :

- La modélisation structurelle d'un système contrôle—commande,
- L'évaluation de la fiabilité du système avec précision, et
- L'obtention un ensemble optimal d'architectures admissibles de système, chaque solution est caractérisée par son niveau de fiabilité, et son coût global.

Nous commençons tout d'abord d'introduire la phase de la modélisation structurelle.

5.5.1 La phase de modélisation

La première phase de la méthodologie de conception est de représenter tout le potentiel de l'information du modèle de système. Ce modèle est construit en utilisant deux activités : la première décrit le système basé sur une modélisation structurelle, tandis que le second ajoute les modes, les relations qualitatives du système.

De ce modèle, l'analyse structurelle consiste à déterminer les différents chemins dans le graphe structurel, à partir de variables connues, permettent d'accéder aux

variables inconnues à mesurer ou à asservir. Dans ce travail, l'état et le mode de système peuvent être pris en compte et permet d'intégrer les contraintes particulières qui leur sont associées. L'intérêt de l'analyse structurelle est de pouvoir établir sous la forme d'expressions booléennes, les différents ensembles de mesures et de commande (grandeurs connues), permettant d'estimer ou de contrôler chaque grandeur inconnue à mesurer ou à asservir.

Cette modélisation peut être représentée par une matrice d'incidence où chaque ligne est associée à une contrainte, et chaque colonne à une variable (**Meguetta,2014 b**).

Nous avons pu voir au chapitre 2 la modélisation structurelle. A titre de rappel, par exemple, la matrice dans la table 5.1 correspond à une partie d'un véhicule électrique comme indiqué dans la figure 5.3. Les instruments disponibles pour ce véhicule sont les suivants :

Moteur électrique, capteur de vitesse C_v , *GPS*.

Les variables considérées sont les suivantes :

a est l'accélération du véhicule, v est la vitesse du véhicule, x est la position du véhicule, U est le signal de commande du moteur, C_v est la mesure donnée par le capteur de vitesse.

Les variables x , v et a sont liées par les deux contraintes suivantes :

$$v(t) = \frac{dx(t)}{d(t)} \quad (5.1)$$

$$a(t) = \frac{dv(t)}{d(t)} \quad (5.2)$$

Nous mettons la valeur 1 entre *Gps* et x dans la matrice d'incidence parce que x est la mesure de la position du *GPS*, le même principe pour C_v et u . Les deux contraintes ne sont pas une fonction inversible si l'état initial est inconnu. Par conséquent, la valeur de x ne peut être déduite sachant que la valeur de v , tandis que le contraire est vrai (ceci est valable dans la contrainte 1), le même principe pour la deuxième contrainte, pour cette raison, nous avons mis la valeur -1 dans la matrice d'incidence.

Enfin, une brève note sur le principe de la dérivée par rapport au temps dans les systèmes dynamiques est traitée dans les premiers chapitres.

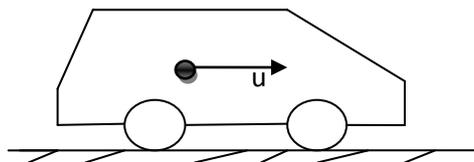


FIGURE. 5.3 – Le véhicule électrique se déplace sur une route plate

Pour plus d'explication, le modèle étudié est représenté par une matrice d'incidence (Table 5.1), dans lequel chaque ligne correspond à une équation et chaque colonne à

une variable. La position (i, j) indique que la variable j apparaît dans l'équation i .

TABLE. 5.1 – Matrice d'incidence du véhicule sur une route plate

capteurs		actionneur	grandeurs physiques		
<i>GPS</i>	C_v	u	x	v	a
1	1	1	1		
				1	
			-1	1	
				-1	1

L'analyse structurelle :

Nous rappelons la raison du choix de l'approche d'analyse structurelle : cette analyse utilise une pauvre connaissance du système ; elle utilise uniquement la relation entre les contraintes et les variables (**Frisk,2003**).

Maintenant, nous expliquons comment une analyse du modèle structurel peut fournir un moyen de représenter les différentes contraintes qui lient les quantités physiques inconnues en fonction des autres variables. Un autre intérêt de cette modélisation est qu'elle n'a pas besoin de l'exactitude d'équations physiques. Par conséquent, ce modèle est facilement construit dans la phase de conception, ce qui permet une modélisation accélérée rapidement.

Construction de la matrice d'incidence globale pour le système

- Grandeur physiques inconnues : grandeur à estimer, à commander.

$$UPQ = Q_1, Q_2, Q_3, .. \quad (5.3)$$

- Grandeur physiques connues : les mesures issues de capteurs et actionneurs, paramètres fixés définies par le système.

$$KPQ = Q_{m_1}, Q_{m_2}, Q_{m_3}, .. \quad (5.4)$$

- Perturbations : Environnementale (la pente), expérimentale (défauts aux instruments..).

$$D = D_1, D_2, D_3, .. \quad (5.5)$$

- Modes de fonctionnement du système.

$$SM = mode1, mode2, .. \quad (5.6)$$

Détermination des chemins de la grandeur physique de la mission fixée par le concepteur :

Etant donnée la formalisation de la mission fixée par le concepteur faite dans la première étape de l'approche proposée de conception : Parmi les missions du système de contrôle–commande (à titre explicatif ; la mission du système consiste à contrôler, ou bien commander, asservir les grandeurs physiques) il convient de rechercher des différentes façons d'obtenir les grandeurs physiques requises à partir de la modélisation structurelle. Cette section permet de trouver les relations (expression algébrique booléenne) entre la grandeur physique de la mission et l'ensemble

des variables de commandes, ensemble des capteurs—actionneurs et aussi ensemble des perturbations agissant sur le système.

Cette section permet de trouver les relations (expression booléenne) entre la variable concernant la mission souhaitée en fonctions des variables connues issues des capteurs et actionneurs, et des perturbations.

Pour notre travail, on utilisera l'algorithme de recherche, pour trouver les chemins de la grandeur physique de la mission visée qui a été présenté dans le deuxième chapitre.

5.5.2 La phase d'évaluation de la fiabilité de la mission $R_{mission}$

Définition des liens structurels : ils représentent des informations sur la liaison entre les variables physiques du système sous forme des relations algébriques booléennes (contenant des opérateurs conjonction \wedge et disjonction \vee). Ces liens donnent une vision complète sur la structure du système étudié, l'interaction physique entre ses instruments (composants).

Il y a deux méthodes pour évaluer la fiabilité, qualitative et quantitative. Dans ce travail, nous allons utiliser la méthode quantitative avec notre contribution : Est-ce qu'on peut évaluer la fiabilité grâce aux liens structurels, autrement dit est ce que l'information sur les liens structurels est nécessaire pour prévoir la maintenance ou faudra-t-il refaire la démarche de conception (Co-conception) du système étudié.

Définition : la fiabilité est la probabilité P qu'une défaillance (dysfonctionnement) se produise après la durée de mission du système étudié $[0, T_{mission}]$.

$$R(t) = P(t > T_{mission}) \quad (5.7)$$

Supposant que le système ayant c_i composant, $[i = 1 \dots N]$ (capteurs et/ou actionneurs) qui peuvent tomber en panne les uns des l'autres. On distingue deux cas d'études qui peuvent se présenter, il s'agit soit d'un système simple, soit d'un système complexe. Un système simple se caractérise par la possibilité d'exprimer la réalisation de la mission en fonction de l'état des composants par une équation booléenne où chaque terme correspondant à un composant, n'apparaît qu'une fois. Pour un système complexe, aucune relation simple n'existe et au moins un composant apparaît plusieurs fois dans l'équation booléenne.

On peut considérer le système structurel étudié : linéaire, discret et commandable. Il est constitué de plusieurs sous-systèmes (ses instruments) $(\sum_i), i = 1, \dots, N$:

$$\begin{cases} x_{k+1_i} &= A_i x_{k_i} + B_i u_{k_i} + E_i f_{k_i} \\ y_{k_i} &= C_i x_{k_i} + D_i u_{k_i} \end{cases} \quad (5.8)$$

Où pour $i = 1, \dots, N$, $x_i \in R^{m_i}$ est le vecteur d'états de sous-systèmes \sum_i , $y_i \in R^{m_i}$ est le vecteur de sorties des sous-systèmes \sum_i , $u_i \in R^{p_i}$ est le vecteur d'entrées de sous-systèmes \sum_i , $f_i \in R^{q_i}$ est le vecteur de défauts qui se produisent sur les c_i sous-systèmes \sum_i . A_i, B_i, E_i, C_i, D_i représentent des matrices de dimensions appropriées.

Pour un système simple (L'hypothèse d'indépendance) :

On suppose que les probabilités de panne des composants sont indépendantes et que la panne d'un composant n'a d'effet que sur le système. De même, aucune défaillance de mode commun n'est prise en compte. Les lois de fiabilité utilisées pour les composants peuvent être de toute nature (**Villemeur,1980**), (**Clarhaut,2009**).

On considère que ce système est composé de c_i composants (instruments), [$i = 1...N$], qui peuvent tomber en panne indépendamment les uns des l'autres. Sa fiabilité $R_{\Sigma}(t)$ (pour un système simple) est donnée par l'ensemble des équations suivantes :

$$R_{\Sigma}(t) = \begin{cases} \prod_{i=1}^N P(\bar{E}_{Dci}/t) & \text{Pour la relation de conjonction } \wedge \\ 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P(\bar{E}_{Dci}/t)) & \text{Pour la relation de disjonction } \vee \end{cases} \quad (5.9)$$

Où : \bar{E}_{Dci} représente l'évènement redouté sur le composant c_i , chaque composant c_i a un taux de défaillance du système $\lambda_{ci(t)}$.

Si nous considérons le taux de défaillance constant. La fiabilité est donnée par la loi exponentielle (**Villemeur,1980**) :

$$R_{ci}(t) = P(\bar{E}_{Dci}/t) = e^{-\lambda_{ci}t} \quad (5.10)$$

Si le taux de défaillance de système est variable, la fiabilité suit la loi de Weibull (**Villemeur,1980**) :

$$R(t) = \begin{cases} e^{-((t-\gamma)/\eta)^\beta} & \text{si } t > \gamma \\ 0 & \text{si } t \leq \gamma \end{cases} \quad (5.11)$$

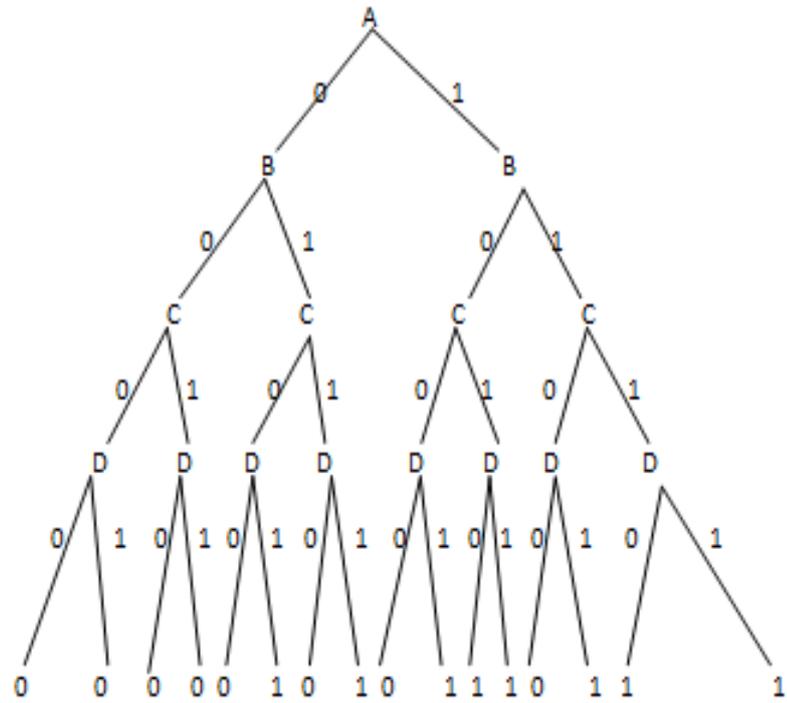
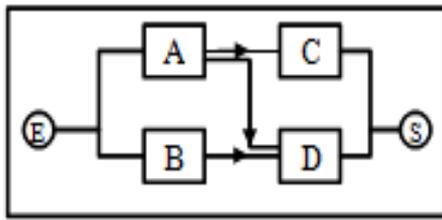
Où : β est un paramètre de forme, γ est le décalage à l'origine, η est le paramètre d'échelle de la distribution.

Pour un système complexe (l'hypothèse de dépendance) :

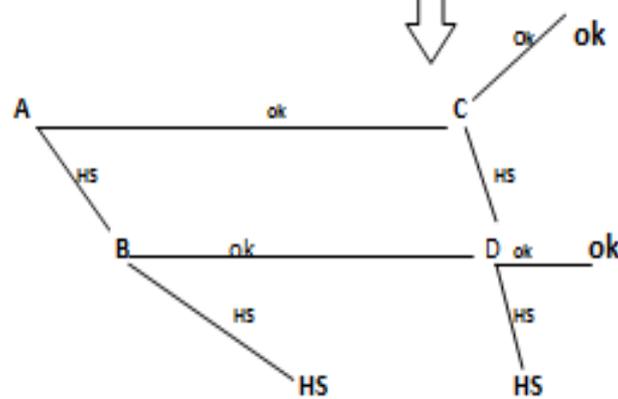
c_i composants, [$i = 1...N$] peuvent tomber en panne dépendamment les uns des l'autres (pour le cas d'un système complexe). De ceci, la quantification de la fiabilité est réalisée par des arbres de décision (**Rauzy,2008**) en utilisant l'intermédiaire de probabilités conditionnelles, les versions simplifiées des arbres de Shannon, on peut faciliter cette évaluation. La quantification d'un tel arbre consiste à évaluer la probabilité d'atteindre chaque noeud, selon les probabilités des valeurs de chacune des variables représentant ici la fiabilité de chaque composant, la figure 5.4. illustre cette méthode d'évaluation.

Dans la figure 5.5., il s'agit d'établir les besoins en instrumentation pour asservir—contrôler la grandeur physique a désignée par la mission. Cette recherche s'appuie sur l'utilisation des expressions booléennes précédemment établies concernant l'accessibilité aux grandeurs à asservir ou à commander ou bien à contrôler. De ceci la mission du système peut être représentée par un diagramme de fiabilité¹ intégrant

1. Diagramme de fiabilité est un outil d'évaluation de la fiabilité sous une représentation graphique de l'architecture fonctionnelle du système à concevoir ; ici dans ce travail de thèse, il est défini par les relations algébriques (et (\wedge), ou (\vee)) basées sur les liens structurels entre les variables du système.



Arbre de Shannon



Arbre de décision réduite (ok : bon fonctionnement, HS : hors service)

FIGURE. 5.4 – Arbre de décision à base du diagramme de fiabilité

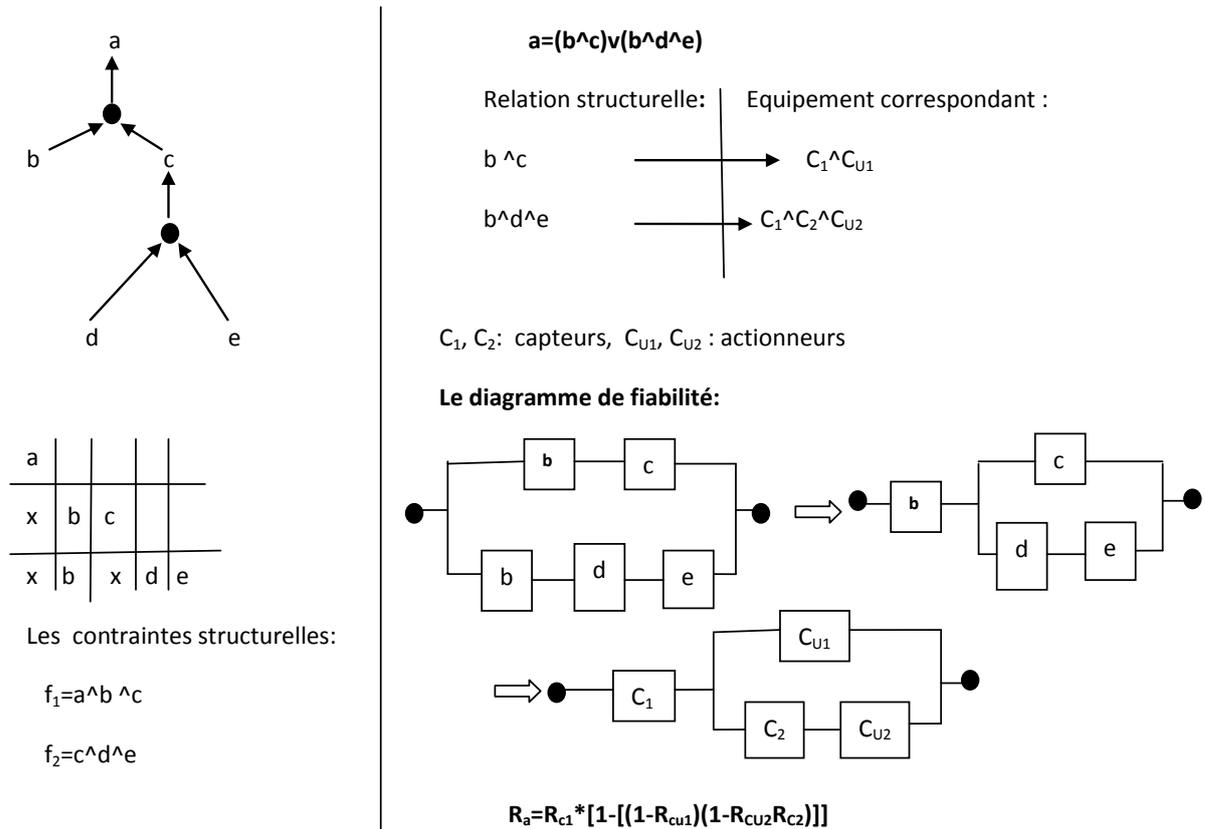


FIGURE. 5.5 – Le passage de représentation structurelle sous des variables du système vers une représentation des équipements

l'instrumentation du système étudié.

Pour plus d'explication de l'exemple présenté dans cette figure, on a utilisé l'algorithme de recherche (cité dans le deuxième chapitre de cette thèse) pour trouver les chemins de la grandeur physique a à base d'un modèle structurel, ensuite, le passage de représentation structurelle sous des variables du système (a, b, c, d, e) vers une représentation des équipements (C_1, C_2, C_{U1}, C_{U2}), tout en calculant la fiabilité à l'aide de la formule de l'hypothèse d'indépendance précédente (système simple).

l'évaluation $R_{mission}$

On trace les courbes d'évolution de la fiabilité de chaque mission au cours du temps. Pour évaluer la fiabilité, nous suivons les étapes suivantes :

- En utilisant la matrice d'incidence globale du système, nous cherchons les différents chemins dans le graphe structurel partant des variables connues et aboutissant à la variable inconnue pour la contrôler ou bien la commander.
- d'après les relations structurelle concernant les variables à contrôler, nous construisons le digramme de fiabilité de chaque mission (le passage de représentation structurelle sous des variables vers une représentation des équipements).
- L'évaluation de la fiabilité selon l'hypothèse proposée précédemment.

5.5.3 La phase de l'optimisation

Le problème de l'optimisation intègre les contraintes de la fiabilité $R(t)$ et les critères de coûts. En résolvant ce problème, le concepteur trouve l'architecture matérielle optimale qui répond aux contraintes de sûreté de fonctionnement (la fiabilité) à moindre coût d'investissement.

Spécification des contraintes de sûreté de fonctionnement :

Dans le cas de la conception d'un système de contrôle—commande, l'objectif est de déterminer l'instrumentation fournissant un coût économique minimal avec un niveau de fiabilité requis. Ce niveau fixé par le critère de la fiabilité $R(t)$, qui doit être spécifié pour chaque mission reliée à l'ensemble d'instrumentation $R(q_i), i : 1 : K$, avec K est le nombre d'instruments dans la démarche de la conception du système étudié. Sachant que, r est la valeur de la fiabilité souhaitée par le concepteur.

$$R(q) \geq r \Rightarrow \begin{cases} R(q_1) \geq r \\ R(q_i) \geq r \end{cases} \quad (5.12)$$

Construction et résolution du problème d'optimisation :

Le problème d'optimisation finale est obtenu en associant le critère de coût aux contraintes de fiabilité $R(t)$. Le critère coût correspond à un coût financier total du système c.—à—d. la somme des coûts individuels des instruments (notée C_{q_i}). Le problème d'optimisation est par conséquent le suivant :

$$\begin{cases} \text{Min}(\sum_1^k C_{q_i}) \\ R(q_i) \geq r \end{cases} \quad (5.13)$$

Ce type de problème d'optimisation s'intègre à la famille Integer Linear Programming (*ILP*) (**Charon,1996**). Pour les moyens systèmes (environ 100 points d'instrumentation), ce problème peut être résolu exactement par la capacité de calcul actuelle. Les algorithmes Branch and Bound sont des techniques d'énumération qui sont bien adaptés pour résoudre ce problème et trouver la solution pour les grands systèmes; les algorithmes stochastiques tels que les algorithmes génétiques peuvent être utilisés (**Charon,1996**). Dans ce chapitre, ce problème d'optimisation est résolu par un programme de calcul informatique.

Le résultat final de la phase d'optimisation est un ensemble optimal d'instrumentation qui satisfait les contraintes de sûreté de fonctionnement imposées par le concepteur à moindre coût, il réside à choisir le meilleur ensemble d'instrumentation du système qui satisfait les contraintes de la fiabilité et à moindre coût d'investissement. Nous pouvons résumer les démarches de la phase de l'optimisation sous l'algorithme suivant :

Algorithme pour trouver le meilleur choix d'un ensemble d'instrumentation.
Soit $E_I, I = 1, ..m$ l'ensemble d'instrumentation admissible concernant la mission fixée par le concepteur. % Le nombre des contraintes d'inégalité est égal au nombre d'ensemble d'instrumentations admissibles $I = 1, ..m$.

$$E_I = \{E_1, E_2, E_3 \dots E_m\}$$

Etape 1 :

$$\text{Min}(\vec{C}_{EI}) = \text{Min} \begin{pmatrix} C_{E_1} \\ C_{E_2} \\ \vdots \\ C_{E_m} \end{pmatrix} = \text{Min} \left(\sum_1^N c_{iEI} \right)$$

% \vec{C}_{EI} est le vecteur des coûts individuels pour chaque ensemble d'instrumentation admissible.

Etape 2 :

$$\vec{R}_{EI} \begin{pmatrix} R_{E_1} \\ R_{E_2} \\ \vdots \\ R_{E_m} \end{pmatrix} \geq r$$

% \vec{R}_{EI} est le vecteur de la fiabilité pour chaque ensemble d'instrumentation admissible.

% R_{EI} est la fiabilité pour chaque ensemble d'instrumentation admissible.

Etape 3 : Le meilleur choix d'un ensemble d'instrumentation

$$\begin{aligned} & \text{le choix} \begin{cases} \text{Min}(\vec{C}_{EI}) \\ \vec{R}_{EI} \geq r \end{cases} \\ & = \text{Vecteur} \begin{pmatrix} E_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_3 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & E_m \\ 0 & 0 & 0 & \vdots \end{pmatrix} \end{aligned}$$

5.6 Cas d'étude : Conception sûre de fonctionnement d'un véhicule électrique

5.6.1 Description du système

Nous considérons le même véhicule électrique (**Meguetta,2012**) étudié dans tous les chapitres de ce travail de thèse, nous récapitulons que les instruments qui sont disponibles dans le véhicule sont : Moteur électrique, Capteur de vitesse, *GPS*, inclinomètre (instrument de mesure de l'inclinaison de la route).

Nous considérons les variables suivantes :

TABLE. 5.2 – Le modèle analytique et structurel du véhicule électrique

Modèle analytique	Modèle structurel
$a_t = \frac{v_{t+\delta t} - v_t}{\delta t}$	$f_1(a_t, v_{t+\delta t}, v_t, \delta t) = 0$
$a_t = g \sin(\alpha_t) - \frac{F_r}{m_t} + \frac{u_t}{m_t}$	$f_2(a_t, \alpha_t, m_t, u_t) = 0$
$c_v^t = v_t + \epsilon_v^t$	$f_3(c_v^t, v_t, \epsilon_v^t) = 0$
$GPS = x_{t-\delta t} + \epsilon_x^t$	$f_4(GPS, x_{t-\delta t}, \epsilon_x^t) = 0$
$I_t = \alpha_t + \epsilon_I^t$	$f_5(I_t, \alpha_t, \epsilon_I^t) = 0$
$c_v^{t-\delta t} = v_{t-\delta t} + \epsilon_v^{t-\delta t}$	$f_6(c_v^{t-\delta t}, v_{t-\delta t}, \epsilon_v^{t-\delta t}) = 0$
$m_{t-\delta t} = M + \Delta m_{t-\delta t}$	$f_7(m_{t-\delta t}, M, \Delta m_{t-\delta t}) = 0$
$t_{descent} = \sqrt{\frac{2x_t}{a_t}}$	$f_8(t_{descent}, x_t, a_t) = 0$
$v_t = \frac{x_t - x_{t-\delta t}}{\delta t}$	$f_9(v_t, x_t, x_{t-\delta t}, \delta t) = 0$
$ch = t_{descent} + \epsilon_{ch}^t$	$f_{10}(ch, t_{descent}, \epsilon_{ch}^t) = 0$
$m_t = M + \Delta m_t$	$f_{11}(m_t, M, \Delta m_t) = 0$
$a_{t-\delta t} = \frac{v_t - v_{t-\delta t}}{\delta t}$	$f_{12}(a_{t-\delta t}, v_{t-\delta t}, v_t, \delta t) = 0$
$a_{t-\delta t} = g \sin(\alpha_{t-\delta t}) - \frac{F_r}{m_{t-\delta t}} + \frac{u_{t-\delta t}}{m_{t-\delta t}}$	$f_{13}(a_{t-\delta t}, \alpha_{t-\delta t}, m_{t-\delta t}, u_{t-\delta t}) = 0$
$\alpha_t = \alpha_{t-\delta t} + \Delta \alpha_t$	$f_{14}(\alpha_t, \alpha_{t-\delta t}, \Delta \alpha_t) = 0$
$v_{t-\delta t} = \frac{x_{t-\delta t} - x_{t-2\delta t}}{\delta t}$	$f_{15}(v_{t-\delta t}, x_{t-\delta t}, x_{t-2\delta t}, \delta t) = 0$

- a_t est l'accélération de véhicule,
- v est la vitesse du véhicule,
- x est la position de véhicule,
- u_t est la commande de moteur qui a un coût égal à 10,
- α est l'angle de la pente,
- I_t est une mesure issue de l'inclinomètre avec un coût égal à 5,
- c_v^t est la mesure issue de capteur de vitesse avec un coût égal à 8,
- gps est la mesure issue de GPS avec un coût de 8,
- CH est la mesure issue de chronomètre avec un coût de 2.

Les prix sont donnés sans unité de monnaie, ils sont déterminés par les catalogues constructeurs. Dans cet exemple, ils ont été choisis arbitrairement.

Nous considérons les paramètres utilisés sont :

- M est la masse du véhicule.
- m_t est la masse réelle du véhicule.
- Δm_t est la variation de la masse issue de la charge transportée sur le véhicule.
- ϵ_I^t est l'incertitude de mesure de la pente.

5.6.2 Modélisation structurelle de véhicule électrique :

Le but de la représentation structurelle est d'identifier les propriétés structurelles du système. Ceux-ci serviront à guider la mise en oeuvre complète en utilisant le modèle de comportement. Nous ne conservons que le modèle de comportement qui exprime l'information de l'existence de relations entre les variables sans prendre en compte leur forme particulière. Les résultats obtenus sont indépendants de modèles de comportement pour chaque activité. Pas de restrictions seront à faire sur le type de modélisation à utiliser. Une analyse structurelle est utilisée pour décrire le système présentée dans la table 5.2 et la matrice d'incidence globale de l'ensemble du système est donnée dans le tableau 5.3. La vision globale du véhicule électrique est montrée dans l'arbre graphique de la figure 5.6. qui représente le résultat de l'algorithme de recherche ; il permet de rechercher les différents chemins pour évaluer une variable inconnue, son principe vise à trouver une variable inconnue en fonction des variables et perturbations connues (Meguetta,2014).

5.6.3 Construction de la matrice d'incidence globale pour le système complet :

Les variables (Meguetta,2014 a) :

- Les grandeurs physiques du processus inconnues : $a_t, v_{t+\delta t}, v_t, x_t$.
- Les grandeurs connues issues des capteurs et actionneurs : I_t, GPS, Ch, c_v^t
- Les modes de fonctionnement de certains composants et les états du système (cas_α) : pente de la route variable (var), pente de la route constante (con).
- Les perturbations environnementales : la pente de la route α_t et $\alpha_{t-\delta t}$.
- Les perturbations liées au modèle du système étudié : $m_t, m_{t-\delta t}, \Delta m_t$.
- Les incertitudes des mesures de capteur de vitesse et l'inclinomètre respectivement : ϵ_v^t et ϵ_I^t .

De même, trois groupes de relations peuvent être distingués :

- celles liées aux contraintes physiques et au processus, vérifiées quel que soit

- le mode de fonctionnement ou état du système : f_1, f_2, f_3, \dots
- celles faisant le lien entre les grandeurs physiques et les capacités de mesure : f_4, f_5, f_6, \dots
- celles spécifiques à des modes de fonctionnement ou bien état particulier des composants : f_7, f_8, \dots

Nous nous référons au papier (**Meguetta,2012**) pour les détails de la modélisation structurelle qui est utilisée pour décrire le système. La matrice d'incidence globale pour le système complet est donnée par la table suivante :

TABLE. 5.3 – La matrice d'incidence globale du système

	<i>Perenvi</i>		Grandeurs physiques										Actionneurs		Capteurs				<i>Permod</i>			<i>Etat_{sys}</i>	
	α_t	$\alpha_{t-\delta t}$	$c_v^{t-\delta t}$	a_t	$a_{t-\delta t}$	$v_{t+\delta t}$	v_t	$v_{t-\delta t}$	x	δt	t_{des}	a_y	$\Delta\alpha_t$	u_t	$u_{t-\delta t}$	Cv	GPS	CH	I	m_t	$m_{t-\delta t}$	Δm_t	cas_α
f_1				1		1				1													var
f_2	1			1									1							1			con,var
f_3							1								1								con,var
f_4																1							con,var
f_5	1																	1					con,var
f_6			1																				con
f_7																					1	1	con,var
f_8				1						1													con
f_9																							con
f_{10}																							con
f_{11}																		1					con
f_{12}					1		1	1												1		1	var
f_{13}		1				1								1							1		con,var
f_{14}	1	1																					var
f_{15}								1		-1													var

D'après la matrice d'incidence globale pour le système complet, la commande u_t peut être évaluée via cet arbre, chaque noeud représente une relation algébrique entre les variables de système. Cet arbre est construit à partir de l'algorithme de recherche qui a été présenté dans le deuxième chapitre des travaux de cette thèse.

5.6.4 L'analyse structurelle :

Remarque : Dans un premier temps, on explique comment calculer la fiabilité grâce aux liens structurels pour réaliser la mission de la vitesse, selon les résultats des architectures admissibles. A titre d'illustration, on effectue notre étude de fiabilité sur une seule architecture admissible pour réaliser la mission de la vitesse (en prenant l'architecture admissible *archi₃*, celle de chapitre 3 de ce travail de thèse).

La mission de contrôle de la vitesse $v_{t+\delta t}$:

L'analyse structurelle est utilisée pour décrire le système et la matrice d'incidence globale pour l'ensemble du système est donnée dans le tableau 5.3. Selon cette matrice les différents chemins pour accéder aux variables qui doivent être contrôlées ou estimées (**Meguetta,2012**). Plus particulièrement, nous supposons que la période d'échantillonnage δt et la masse réelle du véhicule M_t qui change à chaque voyage sont des paramètres connus fixés ; la vitesse du véhicule $v_{t+\delta t}$ peut être estimée en utilisant les relations f_1 et f_2 , entre les mesures de α_t et v_t et le signal de commande u_t valable dans le cas où la pente n'est pas constante. Par conséquent, nous obtenons :

La vitesse du véhicule $v_{t+\delta t}$ peut être déterminée par les relations structurelles f_1 et f_2 :

$$f_1(a_t, v_{t+\delta t}, v_t, \delta t) = 0$$

$$f_2(a_t, \alpha_t, m_t, u_t) = 0$$

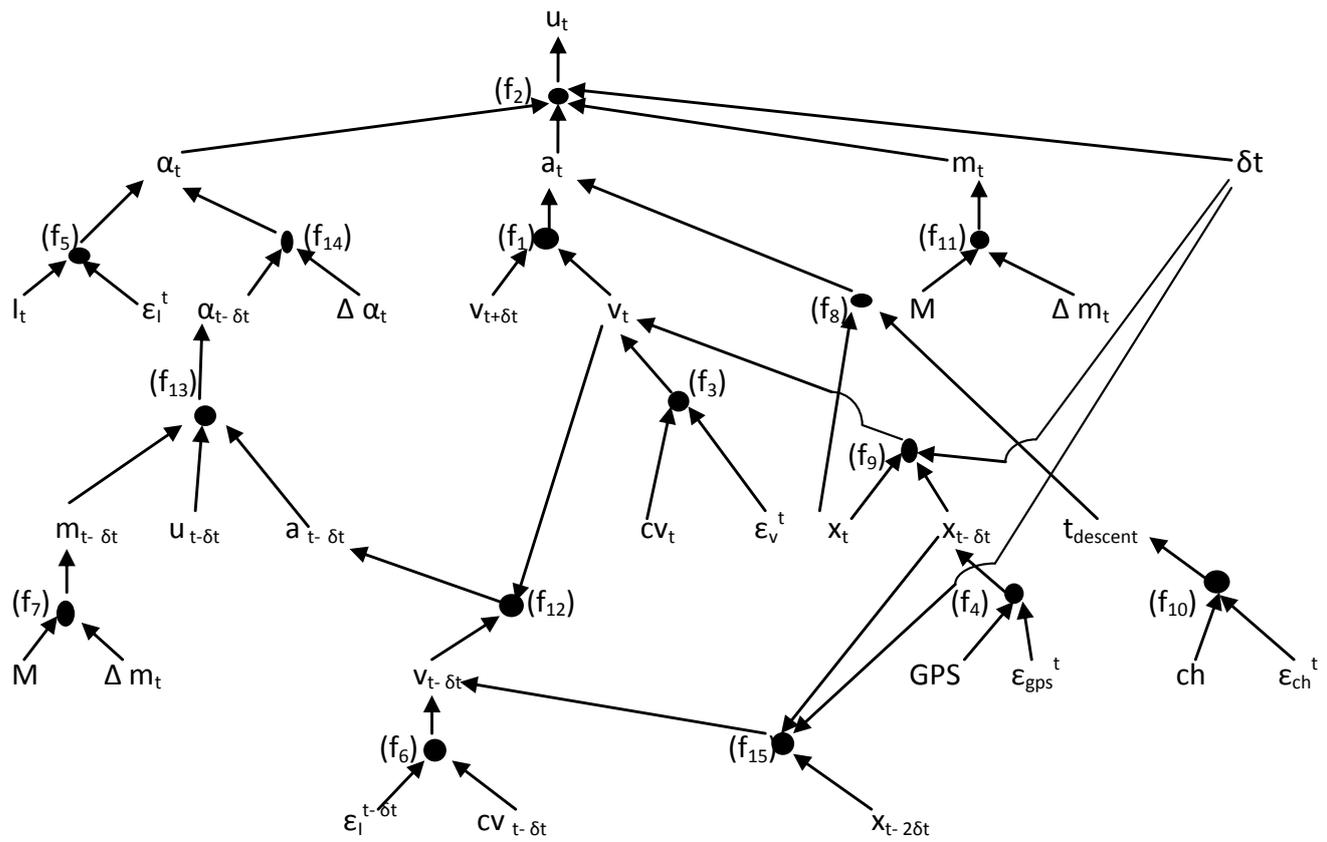


FIGURE. 5.6 – L'arbre graphique représentant les différents liens structurels du système global

De f_1 , sachant que δt est constant :

$$\begin{aligned} v_{t+\delta t} &= f_1^{v_{t+\delta t}}(a_t, v_t, \delta t) \\ &= f_1^{v_{t+\delta t}}(a_t, v_t) \end{aligned} \quad (5.14)$$

De f_2 , sachant que m_t est constant :

$$\begin{aligned} a_t &= f_2^{a_t}(\alpha_t, u_t, m_t) \\ &= f_2^{a_t}(\alpha_t, u_t) \end{aligned} \quad (5.15)$$

Donc :

$$v_{t+\delta t} = f_1^{v_{t+\delta t}}(f_2^{a_t}(\alpha_t, u_t), v_t) \quad (5.16)$$

On obtient :

$$(\alpha_t \wedge u_t \wedge v_t) \Rightarrow v_{t+\delta t} \quad (5.17)$$

La mission consiste à contrôler l'accélération a_t :

L'analyse de la matrice d'incidence fournit que l'accélération a_t peut être déterminée : En utilisant la relation f_2 entre u_t et α_t , nous remplaçons α_t par I_t en utilisant la relation f_5 ou en utilisant les relations f_8, f_{14}, f_{13} ou bien aussi en utilisant les relations f_8, f_{14}, f_{13}, f_9 :

$$f_2(a_t, \alpha_t, m_t, u_t) = 0$$

De f_2 , sachant que δt est constant :

$$a_t = f_2^{a_t}(u_t, \alpha_t)$$

De f_5 , sachant que ϵ_I^t est négligeable

$$\alpha_t = f_5^{\alpha_t}(I_t)$$

$$f_{14}(\alpha_t, \alpha_{t-\delta t}, \Delta\alpha_t) = 0$$

$$f_{13}(a_{t-\delta t}, \alpha_{t-\delta t}, m_{t-\delta t}, u_{t-\delta t}) = 0$$

$$f_{12}(a_{t-\delta t}, v_{t-\delta t}, v_t, \delta t) = 0$$

$$f_9(v_t, x_t, x_{t-\delta t}, \delta t) = 0$$

De f_{14} , avec $\Delta\alpha_t$ est négligeable :

$$\alpha_t = f_{14}^{\alpha_t}(\alpha_{t-\delta t}) = 0$$

De f_{13} , avec $m_{t-\delta t}$ est constant :

$$\alpha_{t-\delta t} = f_{13}^{\alpha_{t-\delta t}}(a_{t-\delta t}, u_{t-\delta t}) = 0$$

De f_{12} , avec δt est constant :

$$a_{t-\delta t} = f_{12}^{a_{t-\delta t}}(v_{t-\delta t}, v_t) = 0$$

De f_{14} et f_{13} , f_{12} :

$$\alpha_t = f_{14}^{\alpha_t}(f_{13}^{\alpha_{t-\delta t}}(f_{12}^{a_{t-\delta t}}(u_{t-\delta t}, v_t, v_{t-\delta t})))$$

De f_9 , avec δt est constant :

$$v_t = f_9^{v_t}(x_t, x_{t-\delta t}) = 0$$

De f_{14} et f_{13} et f_{12} , f_9 :

$$\alpha_t = f_{14}^{\alpha_t}(f_{13}^{\alpha_{t-\delta t}}(f_{12}^{a_{t-\delta t}}(f_9^{v_t}(u_{t-\delta t}, x_t, x_{t-\delta t}, v_{t-\delta t}))))$$

Par ailleurs, de f_{15} , $v_{t-\delta t}$ vaut :

$$v_{t-\delta t} = f_{15}(x_{t-\delta t}, x_{t-2\delta t}, \delta t)$$

De f_{14} , f_{13} , f_{12} , f_9 et f_{15} , avec δt est constant :

$$\alpha_t = f_{14}^{\alpha_t}(f_{13}^{\alpha_{t-\delta t}}(f_{12}^{a_{t-\delta t}}(f_9^{v_t}(u_{t-\delta t}, x_t, x_{t-\delta t}, x_{t-2\delta t}))))$$

On obtient :

$$u_t \wedge (I_t \vee (u_{t-\delta t} \wedge v_t \wedge v_{t-\delta t})) \vee (u_{t-\delta t} \wedge x_t \wedge x_{t-\delta t} \wedge x_{t-2\delta t}) \Rightarrow a_t \quad (5.18)$$

5.6.5 Le résultat de l'évaluation de la fiabilité dans le véhicule électrique

Cette section montre comment est réalisée l'évaluation de la fiabilité de deux missions : Le contrôle de la vitesse $v_{t+\delta t}$ et l'accélération a_t du système.

Mission 1 : L'évaluation de la fiabilité de la mission de contrôle de la vitesse $v_{t+\delta t}$

D'après l'équation 5.17 qui représente l'expression de la mission de contrôle de la vitesse $v_{t+\delta t}$ du véhicule électrique. Le diagramme de fiabilité *RBD* est une représentation quasi-directe de la vue fonctionnelle du système illustré dans la figure 7.7, il permet de montrer comment la fiabilité des composants contribue à la réussite ou à l'échec d'un système complexe.

D'après l'arbre graphique du système global, nous mettons la relation structurelle 5.17 qu'est en fonction des variables physiques issues des équipement pour réaliser la mission de contrôle de la vitesse $v_{t+\delta t}$ avec f_5 et f_3 :

De f_5 , avec ϵ_I^t est négligeable :

$$\alpha_t = f_5^{\alpha_t}(I_t)$$

De f_3 , avec ϵ_v^t est négligeable :

$$v_t = f_3^{v_t}(c_v^t)$$

Alors, nous obtenons que l'évaluation de la fiabilité de contrôler $v_{t+\delta t}$ est fonction de la fiabilité de l'inclinomètre I_t et le capteur de vitesse Cv_t , le moteur électrique u_t :

$$v_{t+\delta t} = g_{mission}(I_t, Cv_t, u_t) \quad (5.19)$$

Pour le diagramme de fiabilité suivant (fig5.7), en prenant l'hypothèse 1 où les composants peuvent échouer indépendamment les uns des autres (cas d'étude de fiabilité d'un système simple).

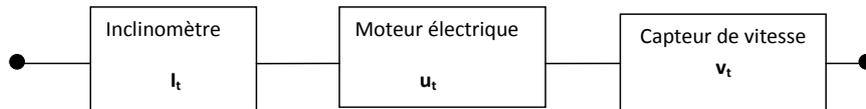


FIGURE. 5.7 – Le diagramme de fiabilité de la mission de contrôle $v_{t+\delta t}$

Nous supposons que la fiabilité des composants suit la fonction de densité de défaillance exponentielle comme indiqué dans l'équation 5.10. Avec l'hypothèse 1, les valeurs de taux de défaillance de chaque composant sont : $\lambda_{inclinomètre} = 0.008$, $\lambda_{capteur\ de\ vitesse} = 0.004$, $\lambda_{moteur} = 0.003$.

En appliquant l'équation 5.9 et 5.17, la fiabilité de système pour contrôler $v_{t+\delta t}$ comme suit :

$$R_{\Sigma v_{t+\delta t}} = R_{\alpha_t} \cdot R_{u_t} \cdot R_{v_t} \quad (5.20)$$

La figure suivante (fig5.8) montre l'évaluation de fiabilité pour la mission de contrôle $v_{t+\delta t}$, nous trouvons qu'après $17\text{jours} = 408\text{heures}$, le système de contrôle de vitesse devient non fiable.

Maintenant, nous allons étudier le problème d'optimisation pour la mission suivante qui donne plusieurs ensembles d'instrumentation admissible pour contrôler l'accélération.

Mission 2 : Détermination d'architecture optimale sûre de fonctionnement pour la mission de contrôle de l'accélération du système a_t :

D'après l'arbre graphique du système global, nous mettons l'expression algébrique de la mission de contrôle de l'accélération a_t du véhicule électrique. Cette dernière représente la relation structurelle 5.18 qui est fonction des variables physiques fournies par les équipements pour réaliser la mission de contrôle de l'accélération a_t avec f_3 et f_4 :

De f_3 , avec ϵ_v^t est négligeable :

$$v_t = f_3^{v_t}(c_v^t)$$

De f_4 , avec ϵ_x^t est négligeable :

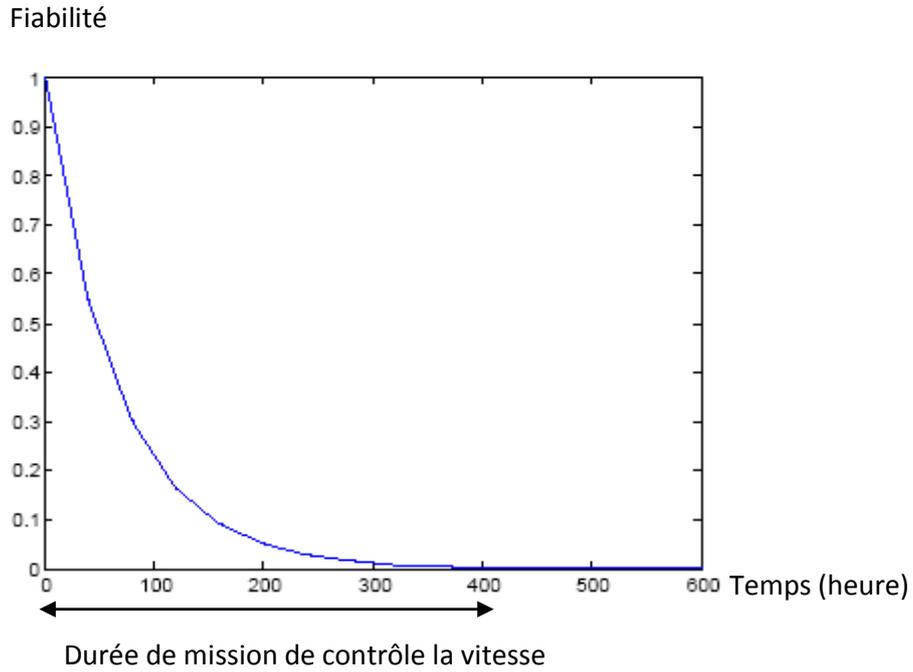


FIGURE. 5.8 – L'évaluation de la fiabilité de la mission de contrôle de la vitesse $v_{t+\delta t}$ en fonction du temps (unité l'heure)

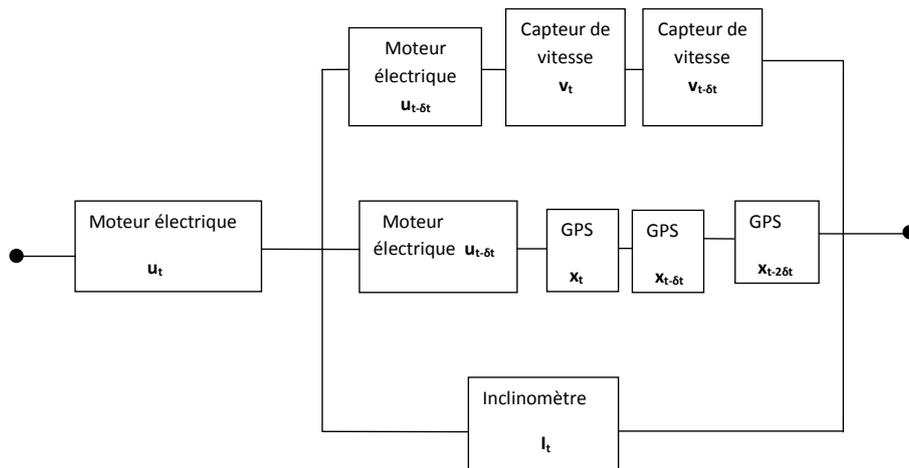


FIGURE. 5.9 – Le diagramme de fiabilité en utilisant les variables des systèmes pour la mission de contrôler l'accélération a_t

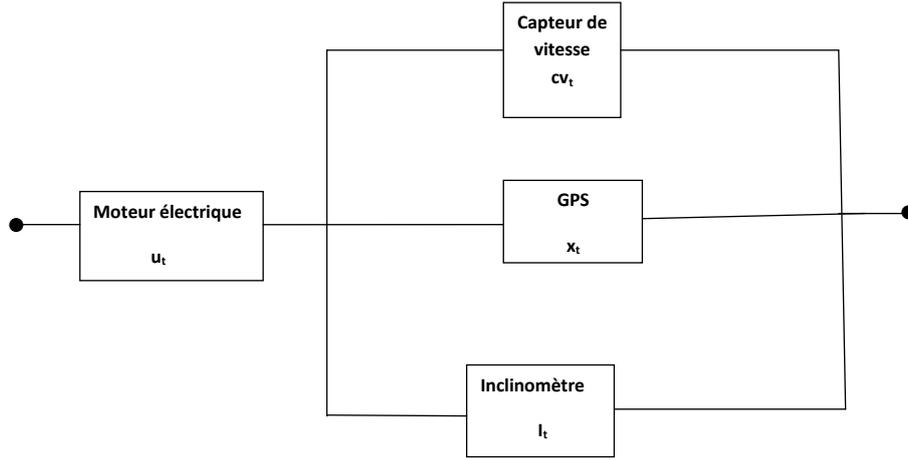


FIGURE. 5.10 – Le diagramme de fiabilité en utilisant les équipements du système de la mission de contrôler l'accélération a_t

$$x_{t-\delta t} = f_4^{x_{t-\delta t}}(GPS)$$

De f_{15} :

$$x_{t-2\delta t} = f_4^{t-2\delta t}(GPS)$$

Alors, nous obtenons que l'évaluation de la fiabilité de contrôler a_t est en fonction de la fiabilité de l'inclinomètre I_t et le capteur de vitesse Cv_t , le moteur électrique u_t , le *GPS* :

$$a_t = g_{mission} \{ (u_t, Cv_t) \vee (u_t, GPS) \vee (u_t, I_t,) \} \quad (5.21)$$

D'après l'équation 5.18 qui représente l'expression de la mission de contrôle de l'accélération a_t du véhicule électrique.

Le diagramme de fiabilité *RBD* pour contrôler l'accélération du système a_t est donné dans la figure 5.9 en utilisant les variables du système étudié et son équivalent en diagramme de fiabilité figure 5.10 en utilisant les ensembles de l'instrumentation implantable dans le système pour contrôler a_t . Pour ce dernier diagramme de fiabilité, on a pris l'hypothèse 1 où les composants peuvent tomber en panne (échouer) indépendamment de chacun d'autre.

Nous supposons que la fiabilité des composants suit la fonction de densité de défaillance exponentielle comme indiqué dans l'équation 5.10. Avec l'hypothèse 1 avec les valeurs de taux de défaillance de chaque composant sont : $\lambda_{GPS} = 0.007$, $\lambda_{inclinomètre} = 0.008$, $\lambda_{Capteur\ de\ vitesse} = 0.004$, $\lambda_{moteur} = 0.003$.

En appliquant l'équation 5.9 et 5.18, la fiabilité de système pour contrôler a_t est définie comme suit :

$$R_{\Sigma_{a_t}} = R_{u_t} [1 - [(1 - R_{I_t})(1 - R_{cv_t}) (1 - R_{GPS})]] \quad (5.22)$$

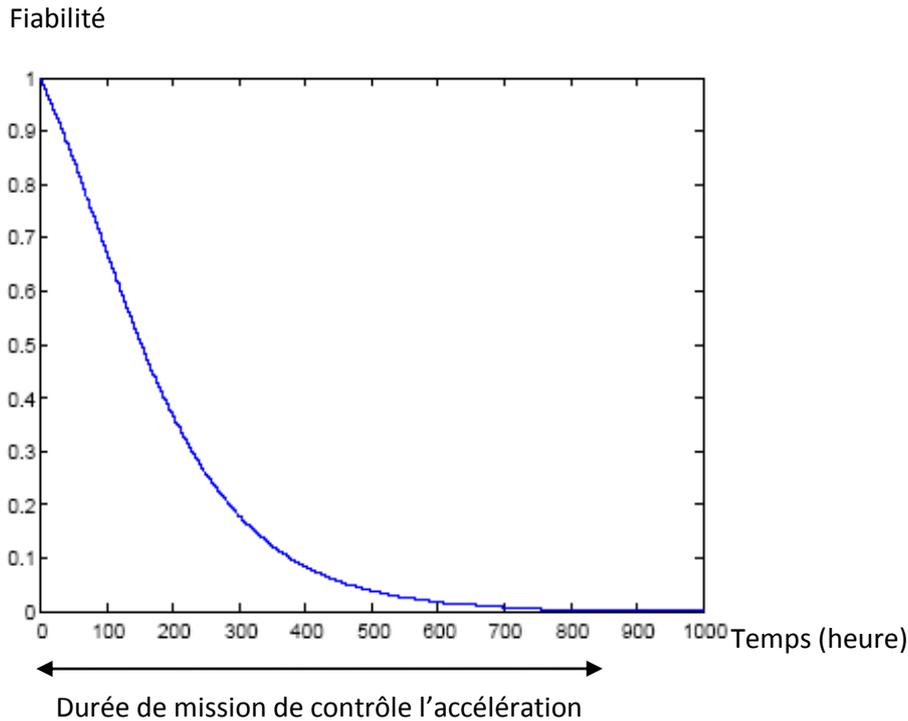


FIGURE. 5.11 – L'évaluation de la fiabilité de la mission de contrôle de l'accélération a_t en fonction du temps (unité de l'heure)

On utilise le critère de la fiabilité concernant l'indépendance entre les capteurs et les actionneurs dans son diagramme de fiabilité. On constate qu'après le calcul de fiabilité, le système de contrôle d'accélération a_t n'est plus fiable de fonctionnement après un mois et quelques jours (816 heures).

5.6.6 La phase de l'optimisation

Pour expliquer la phase d'optimisation, nous prenons le cas de la mission concernant le contrôle d'accélération a_t , il y a trois ensembles d'instrumentation admissibles pour faire cette mission d'après le diagramme de fiabilité étudié précédemment.

Nous choisissons arbitrairement les valeurs des coûts associés à chaque capteur et actionneur aux trois architectures d'instrumentation, $Ci_u = 10$ est le coût de moteur, $Ci_{Cv} = 8$ est le coût de capteur de vitesse, $Ci_I = 5$ est le coût d'inclinomètre, $Ci_{GPS} = 8$ est le coût de *GPS*.

Parmi trois architectures d'instrumentation : l'architecture E_1 qui contient le moteur électrique et l'inclinomètre, l'architecture E_2 qui se compose par le moteur électrique et *GPS* et E_3 contenant le moteur électrique et le capteur de vitesse. Nous optimisons le temps moyen de fonctionnement avant la première défaillance $MTTF^2$.

Lorsque la loi de fiabilité du système suit une fonction exponentielle dans un intervalle de temps déterminé, avec un taux de défaillance λ_i est constant. Nous avons

2. Mean Time To Failure

(Seymour,1993) :

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_i}$$

Alors, pour notre cas d'étude $MTTF$ égale 45.50 :

$$MTTF = \frac{1}{\sum \lambda_i} = \frac{1}{\lambda_{GPS} + \lambda_{inclinom\grave{e}tre} + \lambda_{Capteur\ de\ vitesse} + \lambda_{moteur}}$$

En appliquant la procédure d'optimisation présentée dans l'équation 5.13 à la durée $MTTF = 45.50$, sachant que la valeur de fiabilité désirée par le concepteur r égale $62 \cdot 10^{-2}$, on obtient :

$$\Rightarrow \begin{cases} \begin{cases} Min(C_{EI})_{at} \\ R_{EI}(t)_{at} \geq 62 \cdot 10^{-2} \end{cases} \\ \begin{cases} Min(C_{EI})_{at} = Min(c_u + c_{Cv}, c_u + c_I, c_u + c_{GPS}) \\ R_{E1}(t)_{at} \geq 62 \cdot 10^{-2} \\ R_{E2}(t)_{at} \geq 62 \cdot 10^{-2} \\ R_{E3}(t)_{at} \geq 62 \cdot 10^{-2} \end{cases} \end{cases} \quad (5.23)$$

Discussions sur les résultats d'optimisation :

Nous présentons la démarche d'optimisation bi-critère (fiabilité $R(t)$, coût) dans la figure 5.12. Nous remarquons que les deux architecture d'instrumentation (E_2 , E_3) vérifient les critères techniques- économiques spécifiés par le concepteur.

Pour résoudre ce problème de choix, nous proposons les solutions suivantes :

- Nous mettons la priorité sur le critère technique : la fiabilité. Dans ce cas, on choisit l'architecture d'instrumentation E_3 .
- Nous mettons l'importance sur le critère économique : coût minimum. Dans ce cas, on choisit l'architecture d'instrumentation E_1 , mais cette dernière ne vérifie par la contrainte de fiabilité souhaitée. De ce fait, elle est éliminée par le concepteur.
- On peut aussi choisir l'architecture d'instrumentation E_2 , quasiment, elle vérifie les deux critères.

L'architecture optimale qui satisfait les objectifs et les spécifications de concepteur (au temps $MTTF = 45.50h$), afin de réaliser la mission de contrôler l'accélération a_t :

- L'ensemble de l'instrumentation choisie est E_2 : relie l'actionneur (moteur électrique u_t) et capteur de vitesse. L'intérêt de cette architecture apparaît dans la mesure de l'accélération par intégration aussi, le déplacement par double intégration.

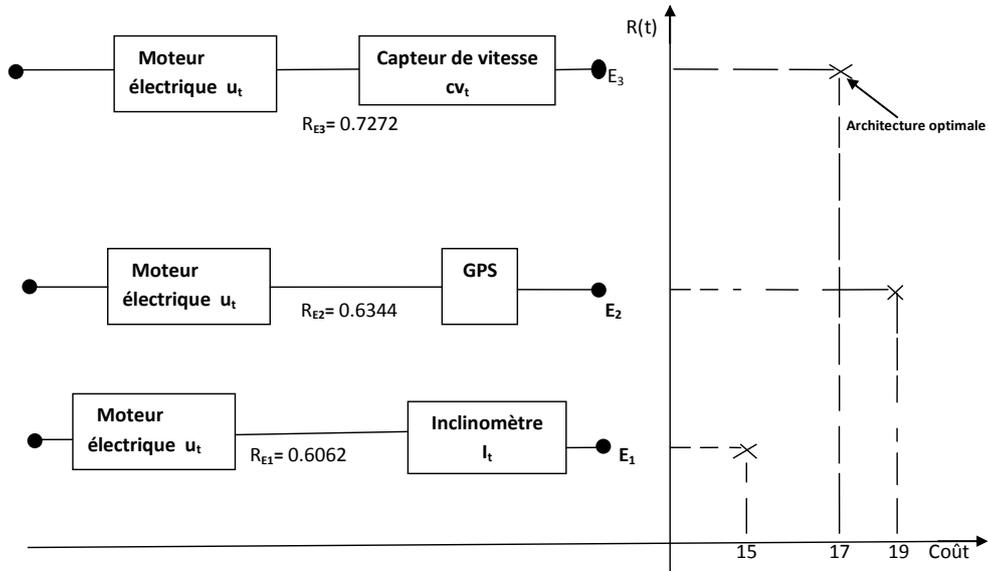


FIGURE. 5.12 – La courbe d'évaluation du critère de fiabilité $R(t)$ en fonction du critère de coût

$$\text{Le choix } \begin{cases} \text{Min}(C_{EI})_{at} \\ R_{EI}(t)_{at} \geq 62 \cdot 10^{-2} \end{cases} = \text{Vecteur } \begin{pmatrix} E_1 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & E_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5.24)$$

$$\text{Le choix } \begin{cases} \text{Min}(C_{EI})_{at} \\ R_{EI}(t)_{at} \geq 62 \cdot 10^{-2} \end{cases} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_3 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.25)$$

- La fiabilité de cette instrumentation pour effectuer cette mission égale 0.7272
- le coût total de cette instrumentation est égal 17

5.7 Conclusion

Dans ce travail, l'approche de conception d'un système contrôle–commande sûr de fonctionnement a été proposée en utilisant la modélisation structurelle qui décrit qualitativement les différentes relations entre les variables d'un véhicule électrique. Elle consiste à évaluer la fiabilité de chaque mission grâce aux relations structurelles entre les variables du système.

La conception d'un système sûr de fonctionnement permet à choisir la meilleure architecture matérielle optimale pour un système contrôle – commande sous bi–critère la fiabilité et le coût.

L'avantage de cette méthode est qu'elle prend en compte le critère de sûreté de

fonctionnement dès la phase de conception.

Conclusion et Perspectives

La méthodologie de conception multi-critère proposée dans ces travaux de thèse a été conçue pour permettre d'optimiser l'architecture d'un système d'instrumentation selon un critère de coût et des performances attendues. Elle s'appuie sur une description des modes de fonctionnement du système contrôle-commande et sur une analyse physique du processus à l'aide d'une modélisation structurelle. Cette méthode est relativement simple et rapide à mettre en marche puisqu'elle ne nécessite pas une connaissance exacte des relations mathématiques qui régissent les grandeurs physiques mais simplement de préciser celles en liaison. De ces informations, elle fournit en final le coût minimal du système d'instrumentation qui respecte un niveau voulu du critère de performance retenue dans la démarche de conception.

L'approche de conception proposée a l'intérêt de pouvoir être utilisée relativement tôt dans la conception d'un système contrôle-commande C-C. Elle permet d'obtenir à la fois, une estimation du coût possible du système C-C et une idée de l'architecture qui semblerait la plus adéquate. De plus, la façon générale de conception multicritère traite les critères de performance avec un point de vue quantitatif répond aux problèmes actuels des concepteurs, concernant leurs difficultés à trouver des informations sur : la performance du système (qualité de commande, qualité de performance, ..), la sûreté de fonctionnement (la fiabilité) surtout dans le cas d'un comportement complexe en présence de fautes qui peut induire une grande variété de modes de défaillance.

Dans le premier chapitre de la thèse, nous avons introduit la démarche de conception du système de Contrôle-Commande, et formulé la méthodologie de conception que nous avons développée.

La modélisation structurelle a été présentée dans le second chapitre. Cette approche est intéressante à utiliser, car elle n'impose pas de connaître en détail les équations du système, ce qui serait difficile pour cette étape de conception où l'on souhaite déterminer l'instrumentation du système. Nous avons proposé de compléter le modèle structurel par des informations de modes ou états du système, ce qui permet de préciser certaines relations. Nous avons, ensuite proposé un algorithme de recherche de chemins pour évaluer la grandeur à commander, l'association de cet algorithme à celui de facteurs communs permet de simplifier les résultats. A ce stade, nous disposons d'un outil de modélisation de l'architecture du système de contrôle commande, qui nous permettra d'évaluer facilement plusieurs architectures.

Le troisième chapitre a permis d'illustrer l'utilisation de l'algorithme proposé pour la conception de l'architecture d'un système de contrôle commande. Nous avons re-

tenu comme premier critère, la qualité de la commande que nous avons estimée à partir des incertitudes de mesures, et des perturbations : la commande d'un véhicule.

Dans le quatrième chapitre, nous considérons la tolérance aux pannes estimée via le nombre de défaillances que le système doit supporter. De la même manière qu'au chapitre précédent, une solution optimale est proposée, en sélectionnant l'architecture la moins onéreuse parmi les architectures admissibles, c'est-à-dire celle répondant aux exigences de tolérance aux fautes exprimées dans le cahier des charges.

Dans le cinquième chapitre, nous avons proposé un moyen d'évaluer la fiabilité du système à partir des liens structurels du modèle. Cette évaluation peut permettre également la sélection d'une architecture optimale.

Dans les différents chapitres, les critères ont été considérés séparément. On pourrait envisager de prendre en compte plusieurs critères, l'approche serait alors multicritères : plusieurs solutions peuvent alors être envisagées : une classification des critères, une pondération des critères, ..

A l'examen des résultats présentés précédemment, nous pouvons observer que dans le cas des essais d'optimisation bi-critère basés sur le coût d'investissement de système à concevoir et avec le critère de performance retenu par le concepteur, une solution parmi les solutions admissibles de l'architecture optimale de système contrôle-commande est obtenue.

A partir de ces résultats, l'intérêt de prendre en compte simultanément des critères économiques et techniques physiques au même niveau est mis en évidence, pour implémenter une méthode de conception optimale sous multicritère.

Des perspectives intéressantes seraient de prendre en compte dans notre approche de conception multicritères, un système contrôle-commande en réseau (système distribué) ; cette méthode de conception consisterait à déterminer l'ensemble des instruments utilisés (nombre et type des capteurs, des actionneurs, des unités de traitement, de calculateurs,..), leur agencement dans un système de communication, les traitements, à implanter et répartition de ceux-ci sur les composants. Dans ce cadre d'étude, on choisirait le critère de performance d'un système C-C en réseau, celui relatif à la sûreté de fonctionnement qui réside à l'évaluation probabiliste de certains paramètres caractérisant la performance d'un dispositif au cours de sa mission. Il s'agit en général de la fiabilité, de la disponibilité du système vis-à-vis du non accomplissement de la mission et du risque d'accident en cas de comportement anormal. Le retard de transmission de l'information entre capteur, actionneur et les unités de calcul peut être considéré comme une perturbation sur le système distribué à concevoir, plus précisément, la méthode de conception multi-critère serait appliquée sur un système de deux véhicules électriques qui échangent l'information grâce à une communication sans fil ; en profitant de nos travaux avancés sur l'outil de l'analyse structurelle.

Nous envisageons une autre approche sur la conception robuste aux incertitudes des instruments par la logique floue. Elle permet la mise en valeur de la méthodologie de conception d'un système de contrôle-commande C-C à base des données

entrée–sortie, précisément les gros systèmes (multi entrées, multi sorties, plusieurs instruments, unité de calculs). Ici, en se focalisant sur la modélisation à l’aide du modèle *ANFIS* neuro–floue de type Takagi–Sugeno *TS* en effectuant l’analyse des données par l’approche de l’analyse en composantes principales *ACP*, on peut déterminer les variables des instruments plus influents dans la méthodologie de conception multi critère à partir de base de données d’un système de contrôle– commande. Des premiers résultats sont publiés dans **(Meguetta,2014 b)** et **(Meguetta,2014 d)**.

Liste des références

(Afnor,1991) Sécurité des Machines Notions Fondamentales, Principes Généraux de Conception, Partie 1 : Terminologie de Base, Méthodologie, AFNOR French Standards NF EN 292, 1991.

(Asokan,2007) A.Asokan and D.Sivakumar, Model-based fault detection and diagnosis using structured residual approach in a multi-input multi-output system. Serbian Journal of Electrical Engineering, vol4, pp133-145, 2007.

(Bayart,1995) Mireille Bayart et Françoise Simonot, Impact de l'ingénierie des réseaux de terrain et de l'instrumentation intelligente dans la conception des architectures des systèmes d'automatisation. Rapport convention MESR 92–P–239, 1995.

(Bae,2001) H.S. Bae, J. Ruy, and J. Gerdes, Road grade and vehicle parameter estimation for longitudinal control using GPS. In Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, San Francisco, CA, 2001.

(Belkherchi,2011) Nassim Belkherchi, Contribution à l'étude du diagnostic et de la commande tolérante aux fautes par l'approche structurelle – application aux procédés biologiques, 05 avril 2011.

(Bernal,1999) L.Bernal Haro, Conception d'ateliers discontinus multi-objectifs de chimie fine par un Algorithme Génétique, Thèse de doctorat, INP ENSIGC Toulouse, France, 1999.

(Bhaskar,2000) V.Bhaskar, S.K.Gupta, A.K.Ray, Applications of multiobjective optimisation in chemical engineering, Reviews in chemical engineering, Vol. 16, No.1, 2000.

(Blanke,2003) M.Blanke, M.Kinnaert, J.Lunze and M.Staroswiecki. Diagnosis and Fault Tolerant Control, Chapter 5 : Structural analysis, Springer-Verlag, 2003.

(Blanke,2006) M.Blanke, M.Kinnaert, J.Lunze, and M.Staroswiecki. Diagnosis and Fault tolerant (2nd ed.), Springer-Verlag,. Berlin Heidelberg, 2006

(Bortolet,2003) P.Bortolet, A.Tiltli, Commande floue de l'approximation à l'apprentissage. Série Systèmes Automatisés – Traité IC², Hermès Science Publications- Lavoisier, Paris, pp.37-91,2003.

(Bouissou,2003) M. Bouissou and J. L. Bon, A new formalism that combines ad-

vantages of fault-trees and Markov models : Boolean logic driven Markov processes, Reliability Engineering and System Safety, vol. 82, pp.149-163, Elsevier Ed, 2003.

(Bouissou,2004) M. Bouissou and Y. Dutuit, Reliability Analysis of a Dynamic Phased Mission System. Santa Fe : MMR2004 Congress, June 2004.

(Boukhobza,2014) Taha Boukhobza and Frédéric Hamelin et Christophe Simon. A graph theoretical approach to the parameters identifiability characterization, International Journal of Control, Taylor & Francis : STM, Behavioural Science and Public Health Titles, PP : 751-763,2014.

(Carpentier,1999) Thierry Carpentier, Placement de capteurs pour la surveillance des processus complexes. Thèse de doctorat soutenue à l'université des sciences et technologies de Lille, spécialité productique : Automatique et Informatique industrielle, le 11 mai 1999.

(Cepin,2002) M. Cepin and B. Mavko, A dynamic fault tree, Reliability Engineering and System Safety, vol. 75, pp. 83-91, Elsevier Ed, 2002.

(Charon,1996) L.Charon, A.Germa et O.Hudry, Méthodes d'optimisation combinatoire. Edition Masson, Paris, 1996.

(Chan,2011) K. Y. Chan, T. S. Dillon, and C. K. Kwong, Modeling of a liquid epoxy molding process using a particle swarm optimization-base fuzzy regression approach, IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 7, no. 1, pp. 148-158, Feb. 2011.

(Chevalier,1999) J.Chevalier, Elaboration d'un protocole d'analyse de cycle de vie des procédés : Application aux traitements des fumées d'incinération des déchets ménagers. Thèse de doctorat, INSA Lyon, France, 1999.

(Clarhaut,2009) J.Clarhaut, B.Conrard,S.Hayat and V.Cocquempot. Optimal design of dependable control system architecture using temporal sequences of failures, IEEE Transactions on reliability, vol 58 Issues 3, sept,pp511-522, 2009.

(Cocquempot,2004) Vincent Cocquempot, Habilitation à diriger des recherches : Contribution à la surveillance des systèmes industriels complexes, 10 novembre 2004.

(Collette,2002) Y.Collette,P.Siarry. Optimisation multi-objectifs, Eyrolles, ISBN : 2-212-11168-1, 2002

(Colorni,1991) A.Colorni, M. Dorizo, V.Manniezzo, Distributed optimisation by ant colonies, Proceedings European Conference on Artificial Life ECAL 91, pp.134, Elsevier Ed., New-York, 1991

(Commault,1991) C. Commault, J.M. Dion and A. Perez, Disturbance Rejection for structured systems, IEEE Trans Automat Control, pp. 884-887, 1991.

(Commault,1997) C. Commault, J.M. Dion and V. Hovelaque, A geometric approach

for structured systems : Application to disturbance decoupling, *Automatica*, vol.33, No.3., pp. 403-409, 1997.

(Commault,2002) C.Commault, J.M.Dion, O. Sename, and R.Moteyian, Observer based fault detection and isolation for structured systems, *IEEE Transactions on Automatic Control* 47 ,2074-2079, 2002.

(Commault,2008) C.Commault, J-M.Dion, and D–H.Trinh, Observability preservation under sensor failure. *IEEE Transactions on automatic control*, Vol, 53, NO, 6, July 2008.

(Conrard,2003) B.Conrard and M.Bayart. Design of safe control system thanks to a combinatorial optimization, proceeding of SafeProcess'03, Washington D.C, 2003.

(Conrard,2007) B. Conrard, V. Cocquempot, and M. Bayart, Design of Automation Systems With Criterion of Cost and Dependability. Tanger, Maroco : Qualita 2007 Congress, March 20-22, 2007

(Conrard,2008) B. Conrard and M. Bayart. Design and optimization of dependable measurement systems, 12th IMEKO TC1 & TC7 joint symposium on Man science & measurement. Annecy, France, 2008.

(Conrard,2009 a) B. Conrard, V. Cocquempot and M. Bayart, Optimisation de l'instrumentation d'un système d'automatisation sur la base d'une modélisation structurelle. Qualita, Besançon, France, 18-20 Mars 2009.

(Conrard,2009 b) B. Conrard, V. Cocquempot and M. Bayart. Sensor and actuator placement with dependability constraints and a cost criterion, IFAC Safeprocess. Barcelona, Spain, June 30-July 3, 2009.

(Conrard,2011) B. Conrard, V. Cocquempot and S. Mili. Fault Tolerant System Design in Multiple Operating Modes using a Structural Model, Conférence ESREL European Safety & Reliability Conference. Troyes, France, 18-22 September 2011.

(Dakil,2014) Manal Dakil et Christophe Simon, Taha Boukhobza. Reliability and availability analysis of the structural observability of bilinear systems : A graph – theoretical approach, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Risk and Reliability, PP : 218–229, 2014.

(Dietz,2004) Adrian Rafael Dietz, Optimisation multicritère pour la conception d'ateliers discontinus multi produits : aspects économique et environnemental, thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 09 décembre 2004.

(Dion,2008) J.M. Dion, C. Commault, approche structurelle des systèmes de la géométrie à la théorie des graphes, *Revue Arima*-volume9, pages 261 à 274, 2008.

(Dugan,2001) J. B. Dugan, Fault tree Analysis of Computer Based Systems, in Annual Reliability and Maintainability Symposium. January 2001.

- (Dunia,1998) R.Dunia and S.Qin. Joint diagnosis of process and sensor faults using pca. In :Control Engineering Practice -CEP, issue 6, 6 :457-469, 1998.
- (Dumont,2006) P.E.Dumont, Tolérance active aux fautes des systèmes d'instrumentation, Thèse de doctorat, Ecole doctorale sciences pour l'ingénieur de Lille, 2006.
- (Dustegor,2004) D.Dustegor, M.Staroswiecki, V.Cocquempot and E.Frisk. Isolabilité structurelle des défaillances Application à un modèle de vanne. RSJESA. Vol 38, pp 103 à124, 2004.
- (Dustegor,2005) Dilek Dustegor, Aspects algorithmiques de l'analyse structurelle pour la surveillance, thèse de doctorat, LAGIS UMRCNRS8146, Lille, 01/12/2005.
- (Dustegor,2006) D. Dustegor, E. Frisk, V. Cocquempot, M. Krysander and M. Staroswiecki, Structural Analysis of Fault Isolability in the DAMADICS Benchmark, In :Control Engineering Practice, Vol.14, issue 6, pp. 597-608, 2006.
- (Floquet,1994) P. Floquet, Habilitation à diriger les recherches INPT, Optimisation et génie des procédés. De l'algorithmique à la logique floue, Toulouse, 1994.
- (Frisk,2003) E. Frisk, D. Dustegor, M. Krysander and V. Cocquempot, Improving fault isolability properties by structural analysis of faulty behavior models : Application to the DAMADICS benchmark problem, Proc. of IFAC Safeprocess'03, Washington, Juin 2003.
- (Gao,2014) Hao Gao, Sam Kwong, Baojie Fan, and Ran Wang. A Hybrid Particle-Swarm Tabu Search Algorithm for Solving Job Shop Scheduling Problems. IEEE Transactions on Industrial Informatics, VOL. 10, NO. 4, November 2014.
- (Goldberg,1989) D.E.Goldberg, Genetic algorithms in search optimisation and machine learning, Addison-Wesley Publishing, 1989
- (Holland,1975) J. Holland, Adaptation in natural and artificial systems, Mit. Press, Cambridge, Mass, 1975
- (Hung,2011) N.xuan-Hung, Réseaux de communication et applications de contrôle–commande. Thèse de doctorat de l'université Toulouse , France, décembre 2011.
- (IEC,2003) IEC, International Electrotechnical Commission, Dependability Management. Part 3-1 : Application Guide, Analysis Techniques for Dependability-Guide on Methodology, Geneva, Switzerland, ISBN 2-8318-6791-6, IEC 60300-3-1, 2003.
- (Isermann,2006) Rolf Isermann, Fault-Diagnosis systems, an introduction from fault detection to fault tolerance. Springer-Verlag Heidelberg, printed in Germany, 2006.
- (Isermann,2007) R.Isermann. Mechatronic systems innovative products with embedded control, Control Engineering Practice. 10 :16, 2007.

- (Javed,2009) U. Javed, M. Suchara, J. He, and J. Rexford, Multipath protocol for delay-sensitive traffic, in Proc. Ist Int. Conf. Commun. Syst. Netw., pp. 1-8, Jan.2009.
- (Kirkpatric,1983) S.Kirkpatric, C.D.Gellat, M.P.Vecchi, Optimisation by simulated annealing, Science, No. 220, pp. 671-680, 1983.
- (Krysander,2002) M. Krysander, M.Nyberg, Structural Analysis utilizing MSS Sets with Application to a Paper Plant , Proc. of the Thirteenth International Workshop on Principles of Diagnosis, Semmering, Austria, 2002.
- (Kumamoto,1996) H. Kumamoto and E. J. Henley, Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists. New York : IEEE Press, ISBN 0-780-31004-7, 1996.
- (Lacrose,1997) V.Lacrose and A. Tilti. Fusion and hierarchy can help fuzzy logic controller designer,International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona,1997
- (Laprie,1995) J. C. Laprie, Guide de la Sûreté de Fonctionnement, Cépaduès, Ed. Toulouse, 1995.
- (Learned,1987) Lessons Learned, Safety instrumented system design, Process safety progress(Vol.187, NO.2), 1987.
- (Lingman,2001) P. Lingman and B. Schmidtbauer, Road slope and vehicle mass estimation using Kalman filtering. In Proceedings of the 19th IAVSD Symposium Copenhagen, Denmark, 2001.
- (Lorentzen,2003) T. Lorentzen, M. Blanke, and H. Niemann, Structural analysis-A case study of the romer satellite, Automation Orsted.DTU Technical University of Denmark, Dk-2800 Lyngby, Denmark, 2003.
- (Macgregor,1995) J.Macgregor and F.Kourti. Statistical process control of multivariate processes. Control Engineering Practice-CEP,(3) :403-414, 1995.
- (Maquin,1997) D.Maquin, M.Luong, and J.Ragot, Fault detection and isolation and sensor network design, European journal of automation 31, no.2, 393-406, 1997.
- (Mechraoui,2009) A.Mechraoui et H.Khan, J-M.Thiriet, Effect of Packet loss on the Quality of control of networked mobile robot, 30th IFAC workshop on Real-Time programming and 4th international workshop on real-time software, Mragowo :Poland, 2009.
- (Mechraoui,2010) A.Mechraoui, Co-conception d'un système commandé en réseaux sans fil à l'aide de réseaux bayésiens distribués. Thèse de doctorat de l'université Grenoble, France, 14 décembre 2010.

(Mechraoui,2011) A.Mechraoui and J-M.Thiriet. Co-conception de robots mobiles commandés en réseaux sans fil, 9 ème congrès international pluridisciplinaire en qualité et sureté de fonctionnement, France : Angers, 2011.

(Meguetta,2012) Z-E.Meguetta and B.Conrard, M.Bayart, Instrumentation for electrical vehicle model on road slope using structural analysis, 20th Mediterranean conference on control and automation(MED), Barcelona, Spain, july 3-6, 2012.

(Meguetta,2013 a) Z-E.Meguetta and B.Conrard, M.Bayart. Conception de l'instrumentation d'un véhicule grâce à une modélisation structurelle sous un critère d'optimisation de la qualité de commande et du coût, QUALITA'2013, 10ème Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sûreté de Fonctionnement, Compiègne, France, 19-22 mars, 2013.

(Meguetta,2013 b) Z-E.Meguetta and B.Conrard, M.Bayart, Design of control architecture based search algorithm for fault–tolerant control system, 2nd International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems, Nice, France, October 9-11, 2013.

(Meguetta,2014 a) Z-E.Meguetta, B.Conrard et M.Bayart, Conception optimale d'architecture de système sûr de fonctionnement sur la base d'une modélisation structurelle. Congrès lambda mu, 21-23 octobre 2014 à Dijon.

(Meguetta,2014 b) Zine-eddine Meguetta, Blaise Conrard and Mireille Bayart. Robust Design of a Control System Instrumentation using Structural Analysis and AN-FIS Neuro-Fuzzy Logic Approaches, Journal of Consumer Electronics Times CET : Automobile Electronics World Academic Publishing, vol.3 ISS.4, PP.242-255, 09 august 2014.

(Meguetta,2014 c) Zine–eddine Meguetta, Blaise Conrard and Mireille Bayart. Design of control system instrumentation based on structural modeling with criteria of quality of control (*QoC*) and cost, *IJISSET* International Journal of Innovative Science Engineering and Technology : www.ijiset.com, Vol.1 Issue9 : ISSN2348 – 7968, November 2014.

(Meguetta,2014 d) Zine-Eddine Meguetta, Blaise Conrard, Mireille Bayart Multi–criteria design optimization of control system instrumentation using Principal Component Analysis (*PCA*) and structural modeling approaches. International Journal of Engineering and Advanced Technology (*IJEAT*) : www.ijeat.org, ISSN : 2249 - 8958, Volume-4 Issue-2, December 2014.

(Metropolis,1983) N.Metropolis, A.Rosenbluth, M.Rosenbluth, A.Teller, E.Teller, Equation of state calculation by fast computing machines, J. Chem. Phys., vol.21, pp. 1087-1092, 1983.

(Metzger,2011) M.Metzger and G.Polakow. A survey on applications of agent technology in industrial process control, IEEE transactions on industrial informatics, vol.7, no.4, November 2011.

(Mihalache,2007) Alin Gabriel Mihalache. Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : Application sur système embarqué. Thèse de doctorat spécialité : Sciences de l'ingénieur, école doctorale d'Angers, à l'Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers. Le 17 décembre 2007.

(Mitchell,2002) J.Mitchell. Branch-and-cut algorithms for combinatorial optimization problems. Oxford University Press, New York, 2002.

(Moncelet,1998) G. Moncelet, Dependability Evaluation of Mecatronic Automative Systems Using Petri Nets, Ph.D. Thesis in French, , Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS, 1998.

(Molla,2004) J.Molla, J. Jacobsa, R.Kustersb and J.Trienekens, detection oriented lifecycle modeling in complex product development. Information and Software Technology, 46 :665-675, 2004.

(Morosan,2011) Petru-Daniel Morosan, Commande prédictive distribuée : Approche appliquée à la régulation thermique des bâtiments. Thèse de doctorat : Ecole doctorale Mathématique, télécommunication, informatique, signal et système électronique, 30 septembre 2011.

(Moncelet,1998) G. Moncelet, Dependability Evaluation of Mecatronic Automative Systems Using Petri Nets, Ph.D. Thesis in French, , Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS, 1998.

(Nikolskaia,2000) M.Nikolskaia, Decision diagrams and applications to reliability analysis. Thèse de doctorat de l'université Bordeaux 1(LABRI), page 167, France, janvier 2000.

(Ould Bouamama,2003) Belkacem Ould Bouamama, Bond graph approach as analysis tool in thermofluid model library conception, Journal of the Franklin Institute 340, no.1,1-23, 2003.

(Plogert,1996) K.Plogert. The tailoring process in the german v-model. Journal of Systems Architecture, 42 : 601 – 609, 1996.

(Pareto,1896) V.Pareto, Cours d'économie politique, Rouge, Lausanne, Switzerland, 1896.

(Park,2014) Kyung-Joon Park, Jaemin Kim, Hyuk Lim, and Yongsoon Eun. Robust Path Diversity for Network Quality of Service in Cyber-Physical Systems. IEEE Transactions on Industrial Informatics, VOL. 10, NO. 4, November 2014.

(Paynter,1961) H.Paynter, Analysis and design of engineering, MIT Press, 1961.

(Pina,2011) I.Pina and K.Yu, H.Huang, Structural modeling analysis and optimization method comparison for spacecraft design, IEEE, 2011.

(Plogert,1996) K.Plogert. The tailoring process in the german v-model. Journal of Systems Architecture, 42 : 601 – 609, 1996.

(Racoceanu,2006) Daniel Racoceanu, Contribution à la surveillance des Systèmes de Production en utilisant les Techniques de l'Intelligence Artificielle., Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Franche Comté, Besançon, 2006.

(Rausand,2004) M. Rausand and A. Hoyland, System Reliability Theory : Models, Statistical Methods and Applications, Second ed. : pp. 99-103, Wiley Ed, 2004.

(Rauzy,2008) Antoine Rauzy. Binary decision diagrams for reliability studies, Book Springer London, 2008.

(Roger,1993) Jyh-shing Roger jang, ANFIS Adaptive Network Based Fuzzy Inference system. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics vol 23 NO3, May, June 1993.

(Roucairol,1998) C.Roucairol, Solving hard combinatorial optimization problems, in : Proceeding of CESA'98, pp. 66-72, 1998.

(Rui,1995) Y.Rui and A.A. ElKeib . A Review of ANN-based Short-Term Load Forecasting Models, Department of Electrical Engineering, University of Alabama, Tuscaloosa, AL 35487,1995.

(Schoenig,2006) R. Schoenig, J. F. Aubry, T. Cambois, and T. Hutinet, An aggregation method of Markov graphs for the reliability analysis of hybrid system, Reliability Engineering and System Safety, vol. 91, pp. 137-148, Elsevier Ed, 2006.

(Sell,2005) R.Sell and M.Tamre, Integration of v-model and sysml for advanced mechatronics system design. In The 6th International Workshop on Research and Education in Mechatronics REM 2005, pages 276-280. France, 2005.

(Seymour,1993) Bob Seymour, MTTF, Failrate, Reliability and Life Testing. Application bulletin : Mailing Address : PO Box 11400, Tucson, AZ 85734, Street Address : 6730 S. Tucson Blvd. Tucson, AZ 85706 Tel : (602) 746-1111. Twx : 910-952-111, Telex : 066-6491, FAX (602) 889-1510, Immediate Product Info : (800) 548-6132, <http://www.ti.com/lit/an/sbfa011/sbfa011.pdf>, U.S.A. December, 1993.

(Sherali,1982) H.D.Sherali, Equivalent weights for lexicographic multi-objective programs : Characterizations and Computations, European journal of operational research, 11, 367 – 379, 1982.

(Simon,2011) Christophe Simon et Samia Maza, Taha Boukhobza. The impact of the actuator failures on the global or partial controllability : A graph theoretical approach, Papyrus Workshop on Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control in large scale processing industries, Porticcio, Corse, France, 2011.

(Simon,2013) Christophe Simon et Manal Dakil, Taha Boukhobza. Connectivity condition for structural properties using a graph theoretical approach : Probabilistic reliability assessment, 5th Symposium on System Structure and Control, IFAC Grenoble, France, 2013.

(Slimen,2011) M–B. Slimen, Conception de lois de commande structurées (hiérarchisées, décentralisées) pour les chaînes de traction pilotées, France : Bordeaux, 2011.

(Sourisse,1997) C. Sourisse and L. Boudillon, La Sécurité des Machines Automatisées : Groupe Schneider France, 1997.

(Staroswiecki,1994) M.Staroswiecki and P.Declerck. Structural decomposition of large scale systems for the design of failure detection and isolation procedures, journal of systems science, vol20 (1), pp. 31-42, 1994

(Staroswiecki,2000) M. Staroswiecki, M. Cassar and J.PH. Declerck, A structural framework for the design of FDI in large scale industrial plants, In Issues of fault diagnosis for dynamic Systems ed. R. Patton, P. Frank , and R. Clark, Springer Verlag, 2000.

(Stefanis,1995) S. K.Stefanis, A. G. Livingston and E. N.Pistikopoulos, Minimizing the environmental impact of process plants : a process systems methodology, Computers Chem. Engng. Vol. 19, Suppl., pp. S39-S44, 1995.

(Stefanis,1997) S. K.Stefanis, A. G. Livingston and E. N.Pistikopoulos, Environmental impact considerations in the optimal design and scheduling of batch processes Computers Chem. Engng. Vol. 21 No. 10, pp. 1073-1094, 1997.

(Steuer,1989) R.E. Steuer, Multiple Criteria Optimization : Theory, computation, and application, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1989.

(Sueur,1991) C. Sueur and G. Dauphin-Tanguy, "Bond Graph Approach for Structural Analysis of MIMO Linear Systems" Journal of the Franklin Institute. Vol. 328, No 1, pp. 55-70, 1991.

(Tagina,1996) M. Tagina, J.Ph. Cassar, G. Dauphin-Tanguy, and M. Staroswiecki, Bond-graph models for direct generation of formal fault detection systems, Systems Analysis Modelling and simulation J.23, 1-17, 1996.

(Tang,2014) K. S. Tang, R. J. Yin, S. Kwong, and K. T. Ng, "A theoretical development and analysis of jumping genetic algorithm," IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 7, no. 3, pp. 408-418, Aug. 2011.

(Thomas,2002) Philippe Thomas, Contribution à l'approche booléenne de la sûreté de fonctionnement : L'atelier logiciel Aralia WorkShop. Thèse de doctorat, L'université de Bordeaux, 6 février 2002.

(Villemeur,1980) A.Villemeur. Dependability of industrial sytem. Book in French,

Eyrolles, Paris, ISSN0339-4198, 1980

(Villemeur,1988) A. Villemeur, Dependability of Industrial Systems, ISSN 0339-4198, 1988.

(Wang,2004) P.Wang and D. Coit . Reliability prediction based on degradation modeling for systems with multiple, 2004.