République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr. Yahia FARES de MEDEA



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie de la Matière

Mémoire de projet de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme

De master en génie mécanique / Option : mécatronique

Thème

LA CONCEPTION OPTIMALE DES SYSTEMES MECATRONIQUES POUR LES APPLICATIONS CRITIQUES

Dirigé par :

Mr. TCHOKETCHKEBIR Sofiane

Mr. BENGARBIA Bilal

Présenté par :

BOUTRIA Sofiane

BOUCHEHER Ismail

PROMOTION : 2012

Résumée

La mécatronique est issue de l'intégration de technologies provenant de la mécanique, de l'électronique, de l'automatique et de l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité

Les méthodes les plus adaptées pour la modélisation des systèmes mécatroniques comme le système de freinage ABS et les graphes de Markov et les réseaux de Petri.
Cette modélisation est effectuée dans l'environnement Simulink par matlab Ceci nous permet de déterminer le temps de freinage en utilisant le système ABS.

موجز

الميكاترونيك هو نتيجة لدمج التكنولوجيات من التكنولوجيا الميكانيك والإلكترونيات والأتوماتيك و الإعلام الآلي في تصميم وتصنيع منتج من أجل زيادة و/او تحسين الوضائف
الطرق الأكثر استعمالا في نمذجة نظم الميكاترونيك مثل نظام الكبح المضاد للغلق هي الرسوم البيانية لماركوف و شبكات بيتري
وتتم هذه النمذجة في اطار Simulink بواسطة matlab
وهذا يسمح لنا لتحديد الوقت اللازم للكبح عند استخدام نظام الكبح المضاد للغلق

Abstract

Mechatronic is the result of the integration of technologies from mechanics, electronics, automation and information technology in the design and manufacture of a product in order to increase and / or optimize functionality
The most appropriate methods for the modeling of mechatronic systems such as ABS braking system and Markov graphs and Petri nets.
This modeling is done in Simulink by matlab This allows us to determine the braking time using the ABS system.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre 01 : Introduction sur la mécatronique

1.1. Introduction : ……..…..1

1.2. Historique :……..……..1

1.3. Qu'est-ce qu'un système mécatronique :……2

1.4. Les déférents d'applications d'un system mécatronique :……..3

1.5. Caractérisation des systèmes mécatroniques :……7

1.6. L'avantage de la mécatronique :……...…10

1.7. Conclusion :……...11

Chapitre 02 : Conception d'un système mécatronique

2.1. Introduction:……...…….12

2.2. Système mécatronique :……...…...13

2.2.1. Définition d'un système mécatronique :……..……...13

2.2.2. Structure d'un système mécatronique:……..……...14

2.3. L'aspect dynamique hybride des systèmes mécatroniques :……..……16

2.3.1Définition :……..……...16

2.4. La Sûreté de Fonctionnement des systèmes mécatroniques :……17

2.4.1. Limites des méthodes classiques :……..17

2.4.2. La fiabilité des systèmes dynamiques hybrides :……19

2.5. La conception d'un système mécatronique :……..20

2.5.1. De l'ingénierie séquentielle a l'ingénierie concourante :……21

2.5.2. Le cycle de conception en V :…….22

2.6. Le prototypage virtuel :……..24

2.7. La conception de la chaine d'actionnement :…….27

2.8. Les différents problèmes de conception :……...29

a. La synthèse d'architecture :……...30

b. Le problème de sélection de sous-systèmes ou de composants :……..…31

c. synthèse paramétrique :…….....32

2.9. Les besoins en termes d'outils :……....32

2.10. Les besoins en termes de langages :…….…....32

2.11. Le dimensionnement de la chaine d'actionnement :…….…...34

2.11.1. Méthode essai → erreur → correction :……...….35

2.11.2. Les critères de sélection :……...…..37

a : Méthode de Newton :…….……..…37

b : Méthode de Coeuillet:…….……..…...38

c: Discussion des méthodes :……...…….38

2.12. Conclusion :……...……..39

Chapitre 03 : Modélisation d'un système mécatronique

3.1. Introduction :……..40

3.2. Les systèmes de contrôle-commande :……...43

3.3. Formalismes de modélisation :…….....46

3.3.1. Préambule :……..……...46

3.3.2. Modélisation hybride :…….…...47

3.3.2.1. L'approche intégrée :…….…..47

3.3.2.2. L'approche séparée :…….…...48

3.4. Définitions et terminologies des chaînes de Markov:…….……...49

3.5. Notions élémentaires sur les réseaux de pétri :…….……..…52

3.5.1 Définition (Réseau de Pétri) :……..…52

3.5.2. Règles de fonctionnement et circulation des jetons :……..…53

3.5.3. Modélisation de la concurrence (ou logique) et de la synchronisation (et logique) :.…54

3.5.4. Temporisation des places et/ou des transitions :…….……55

3.5.5. Graphes d'événement :……....56

3.5.5.1. Restrictions et capacités de modélisation :……..56

3.5.5.2. Une propriété fondamentale des graphes d'événements :……...….56

3.5.5.3. Exemples :……56

3.5.5.4. Modifications :…….57

3.5.6. Autres classes de réseaux de pétri :…….59

3.5.6.1. Réseau de Pétri synchronisé :……...59

3.5.6.2. Réseau de Pétri généralisé :……...…..60

3.5.6.3. Réseau de Pétri à arcs inhibiteurs :……...……...60

3.7. Conclusion :……...……61

Chapitre 04 : Application sur un système de freinage Antiblocage ABS.

4.1. Introduction :……..…....63

4.2. Les composants du système ABS :……...….65

4.3. Comment fonctionne le système ABS :……...……..66

4.4. Autotests du système :……68

4.5. Freinage en mode normale :……..69

4.6. Freinage en mode antiblocage :……...…..69

4.7. Séquence des événements :……...…..…70

4.8. Modélisation du système ABS grâce aux réseaux de Pétri :……...…...76

4.8.1. Intégration du modèle physique du système ABS :…….……...…77

4.8.2. Détermination des équations différentielles :……..…....77

4.8.3. Simulation du model ABS :…….……..…79

4.8.4. Les résultats de simulation :…….…….….81

4.9. Conclusion :……..….86

Conclusion générale

Référence bibiographie

Liste des figures :

Figure 1 – La Mécatronique : synergie de différentes disciplines

Figure 2 – Exemples de systèmes mécatroniques

Figure .3 – Évolution de l'automobile grâce aux systèmes mécatroniques

Figure 4 – Schématisation des grandes fonctions supplémentaires offertes par un système Mécatronique et des éléments physiques correspondants

Figure 5.- Éléments constitutifs d'un système mécatronique

Figure. 6 - Structure de principe d'un système mécatronique

Figure 7. - Interaction entre processus continus et discrets dans un Système mécatronique

Figure.8- .le cycle de conception en v

Figure 9 – Intérêt du prototypage virtuel dans le cycle de conception en V

Figure 10- Un niveau d'abstraction correspond à plusieurs niveaux de développement

Figure 11 – Partie de la conception traitée dans le mémoire

Figure 12 – Niveaux de développement traités dans le mémoire

Figure 13 – Capitalisation des efforts de modélisation grâce aux bibliothèques de modèles

Figure 14 – Dimensionnement de la chaîne d'actionnement par modèles directs : méthode essai → erreur → correction

Figure 15- Traitement des différentes modélisations

Figure 16- Interactions Système de Contrôle-Commande/Processus physique

Figure 17 -Décomposition du système en PC et PO

Figure 18 - la probabilité de passage

Figure19 - Diagramme de la fiabilité

Liste des figures

Figure20 - Graphe de transition

Figure 21- probabilités de fonctionnement

Figure 22- probabilités de réparation

Figure23 - exemple de RdP

Figure 24- Modélisation de la concurrence et de la synchronisation

Figure 25- la transformation d'une transition

Figure 26- représentations d'une machine

Figure27 - Modélisation de la machine

Figure28-RdP indique une capacité de stockage

Figure29 - Le temps de déplacement du convoyeur

Figure 30- Machine a une capacité de traitement (système est représenté par le modèle RdP)

Figure31 - machine a un temps de setup

Figure32 - le système modélisé par un RdP synchronisé

Figure 33 - .Réseau de Pétri généralisé

Figure34 - franchissement de la transition

Figure 35-descriptions du système hydraulique des freins antiblocage

Figure 36 - Dessin synthétiseur montre les composants du système ABS

Figure 37 -dessin défini le fonctionnement d'un système ABS (montée en pression)

Figure 38 - dessin défini le fonctionnement d'un système ABS (maintien de la pression)

Figure 39 -phase de maintien de la pression

Figure40 - Phase de diminution de la pression

Figure 41 -phase d'augmentation de la pression

Figure 42 - phase desserrage des freine

Liste des figures

Figure 43- Réseau de Pétri pour le système ABS.

Figure 44- Efforts agissant sur une voiture freinée

Figure 45 - Efforts agissant sur une roue freinée

Figure 46 - Simulation du système ABS.

Figure 47 -les résultats de simulation pour une vitesse de 20m/s (a) avec ABS (b) sans ABS.

Figure 48 - les résultats de simulation pour une vitesse de 40m/s (a) avec ABS (b) sans ABS

Figure 49- les résultats de simulation pour une vitesse de 50m/s (a) avec ABS (b) sans ABS.

Figure 50- les résultats de simulation pour une vitesse de 60m/s :, (a) avec ABS (b) sans ABS

Figure 51- les résultats de simulation pour une route sèche : (a)sans ABS, (b) avec ABS.

Figure 52- les résultats de simulation pour une route mouillée: (a)sans ABS, (b) avec ABS.

Figure 53- les résultats de simulation pour une route enneige : (a)sans ABS, (b) avec ABS

Figure 54- les résultats de simulation pour une route glace: (a)sans ABS, (b) avec ABS.

Figure 55- le cout de fonctionnement : (a) sans ABS, (b) avec ABS.

Liste des tableaux

Tableau 1 – Caractérisation des systèmes

Tableau 2 : Résultats des simulations pour différentes vitesses initiales.

Tableau 3 : Résultats des simulations pour différentes plateforme avec vitesse initiale 40m/s.

Chapitre : 03

MODELISATION D'UN SYSTEME MECATRONIQUE

CHAPITRE : 01

INTRODUCTION A LA MECATRONIQUE

Chapitre : 02

CONCEPTION MECATRONIQUE

Chapitre : 04

APPLICATION SUR UN SYSTEME DE FREINAGE ENTIBLOCAGE

Introduction générale

Introduction :

La conception des systèmes à connue une grande utilisation dans différents domaines, à titre d'exemple l'industrie. Alors que pour assurer le suivi des fluctuations des marchés et se distinguer ainsi de ses concurrents, l'industrie en question se doit d'adopter de nouvelles méthodes de conception bien sûr moins coûteuses en termes financiers mais aussi moins coûteuses en termes de temps d'étude.

Ces exigences du marché sont d'autant plus difficiles à satisfaire qu'à l'inverse, les produits à concevoir sont de plus en plus complexes et doivent être de plus en plus performants pour répondre, entre autres, aux nouvelles normes en termes de pollution et de sécurité ou encore à l'exigence accrue des consommateurs en termes de confort et d'assistance.

Afin de concilier toutes ces contraintes de conception, de nouveaux systèmes dits systèmes mécatroniques sont apparus. Cependant, si leur pluridisciplinarité permet d'envisager des solutions originales qui n'avaient jusqu'alors pas été explorées ou autorisées par de nouvelles avancées technologiques, celle-ci demande également un changement de méthode dans le processus de conception. En effet, même si auparavant les systèmes complexes pouvaient utiliser différentes technologies issues de différents domaines de la physique, ils relevaient plus d'une juxtaposition de disciplines plutôt que d'une réelle synergie.

Dans notre mémoire on intéresse à la Conception optimale des systèmes mécatroniques intelligents pour les applications critiques, et comme application on à prend le système de freinage ABS comme un exemple réel et applicable pour bien comprendre le démarche de la conception mécatronique.

Pour bien réaliser une conception d'un système mécatronique il faut prendre en compte des objectifs importantes talque la fiabilité, la consommation d'énergie et surtout la

sécurité qui joue un grand rôle, sans oublier le cout de cette conception et d'autres propriétés qui assure la bonne conception.

Au début on à fait une introduction générale à la mécatronique, son histoire et ses caractéristiques principales et on a déterminé ses avantages essentiels comme un chapitre.

Le 2 ^{eme} chapitre on a généralisé la conception d'un système mécatronique en déterminant tout ce qui concerne cette conception à l'aide d'un cycle qui s'appelle le cycle de conception en V.

Dans le 3eme chapitre on a précisé la modélisation et l'optimisation d'un système mécatronique par le Réseau de Pétri.

Et à la fin un 4eme chapitre qui contient une application de ce système mécatronique sur un système de freinage ABS comme exemple.

Ce chapitre est consacré à l'établissement du cadre général de nos travaux. après avoir défini la notion de système mécatronique, la conception de ces systèmes est abordée : d'une manière très générale pour commencer avec les notions d'ingénierie concourante, de cycle de conception et de prototypage virtuel puis, de manière plus précise, en se focalisant sur la conception d'une partie d'un système mécatronique, à savoir sa chaîne d'actionnement.

Chapitre 01

Introduction sur la mécatronique

1.1. Introduction :

Aujourd'hui, pour faire face à la conjoncture économique et à la mondialisation des marchés, chaque industrie doit savoir renouveler sa gamme de produits : il est plus que primordial de satisfaire les demandes toujours croissantes des consommateurs mais aussi de contrer les produits concurrents. Pour être efficace en termes de retour sur investissement, ce renouvellement doit donc être fréquent et s'adapter aux réalités du marché les coûts et les temps de développement doivent alors être réduits au maximum, alors qu'a contrario les performances demandées sont de plus en plus sévères. Des nouvelles contraintes environnementales apparaissent dans le cadre du développement durable, de nouvelles normes en termes de sécurité sont exigées . . . désormais, grâce aux avancées technologiques, les utilisateurs attendent même des systèmes qu'ils soient « intelligents » et qu'ils assurent de nouvelles fonctionnalités en termes de confort et d'assistance.

Pour répondre à la complexité des cahiers des charges actuels, de nouveaux systèmes, dits systèmes mécatroniques, sont apparus. Fondamentalement pluridisciplinaires, ces systèmes nécessitent une autre approche de la conception qui, jusqu'alors, n'était vue que comme la juxtaposition de différentes approches orientées métiers.

1.2. Historique :

Avant d'aborder la conception mécatronique et les difficultés qui s'y rattachent, il convient tout d'abord de définir ce qu'est exactement un système mécatronique et pour cela, cette partie présente une courte introduction à cette discipline qu'est la mécatronique et dessine l'architecture générale que peut avoir un système mécatronique.

Concaténation des mots mécaniques et électroniques, le terme mécatroniques, vraisemblablement été inventé en 1969 par l'ingénieur japonais Mori Tetsuro [1896,1969] de la société Yasukawa Electric. La rétrospective d'Isermann indique que, si au début des années 80, ce qualificatif était attribué à tout mécanisme électrifié, il prit un autre sens lors de son apparition en Europe.

En effet, au milieu des années80, la mécatronique se définissait alors comme une discipline transverse de l'électronique et de la mécanique (mécanique au sens large incluant l'hydraulique, la thermique, etc.). Depuis, sa signification a encore évolué.

La mécatronique n'est plus simplement à l'interface de ces deux domaines et inclut bien d'autres disciplines comme celles issues des technologies de l'information (acquisition de données, commande, intelligence artificielle,…….), Comme exemples de systèmes mécatroniques, nous pouvons citer :

- Véhicule automobile moderne : système antiblocage (ABS : Anti Blocking System),programme de stabilité électronique (ESP: Electronic Stability Program), direction assistée.

- Avion de chasse .

- Machine-outil à commande numérique .

- Disques durs .

- Machines à laver « intelligentes » .

- ... Etc.

1.3. Qu'est-ce qu'un système mécatronique :

Les entreprises d'aujourd'hui utilisent une approche mécatronique pour intégrer des composants électroniques, mécaniques et logiciels de plus en plus complexes, elles gagnent ainsi du temps et réduisent le risque d'erreurs sur l'ensemble du processus de conception et pour bénéficier de tous les avantages du développement de produits mécatroniques de ces deux domaines et inclut bien d'autres disciplines comme celles issues des technologies de l'information (acquisition de données, commande, intelligence artificielle,...)(Fig. 1).

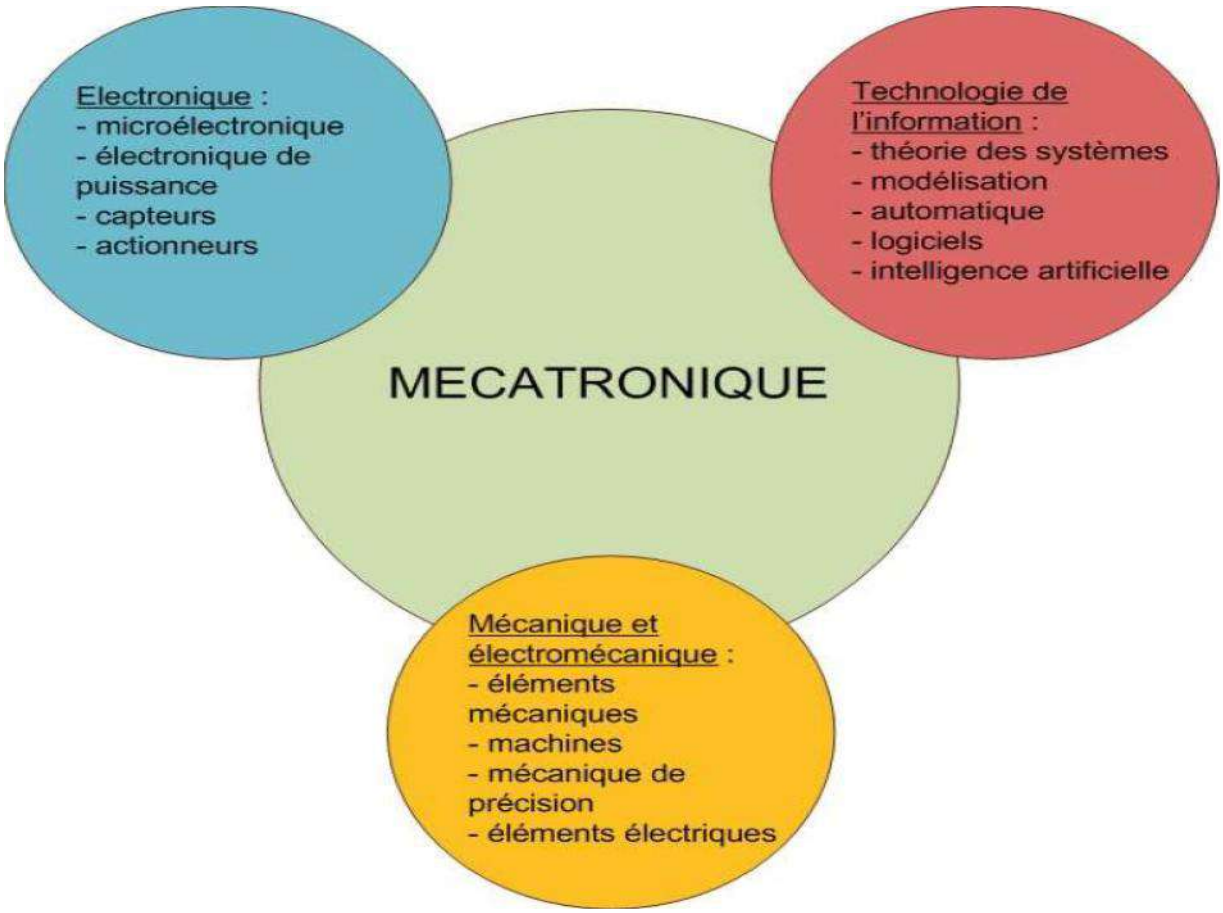


Figure 1. La Mécatronique : synergie de différentes disciplines

1.4. Les déférents d'applications d'un system mécatronique :

Aujourd'hui, la Mécatronique est en pleine expansion et de nombreux exemples de systèmes mécatroniques nous entourent aussi bien dans le monde industriel que dans notre vie au quotidien.

La figure 2 nous montre un bref aperçu des applications possibles que ce soit dans le domaine des loisirs (caméscope, lecteur CD, jouet,...) de l'aide aux tâches ménagères (lave-vaisselle, machine à café,...), de la médecine (robot de chirurgie mini-invasive, prothèse,...), de la recherche spatiale (robot explorateur, satellite,...), de la fabrication (machine-outil à commande numérique, chaîne automatisée d'assemblage,...) ou encore des transports (avion, véhicule routier,...). en réalité, les applications sont diverses et variées et semblent même infinies.

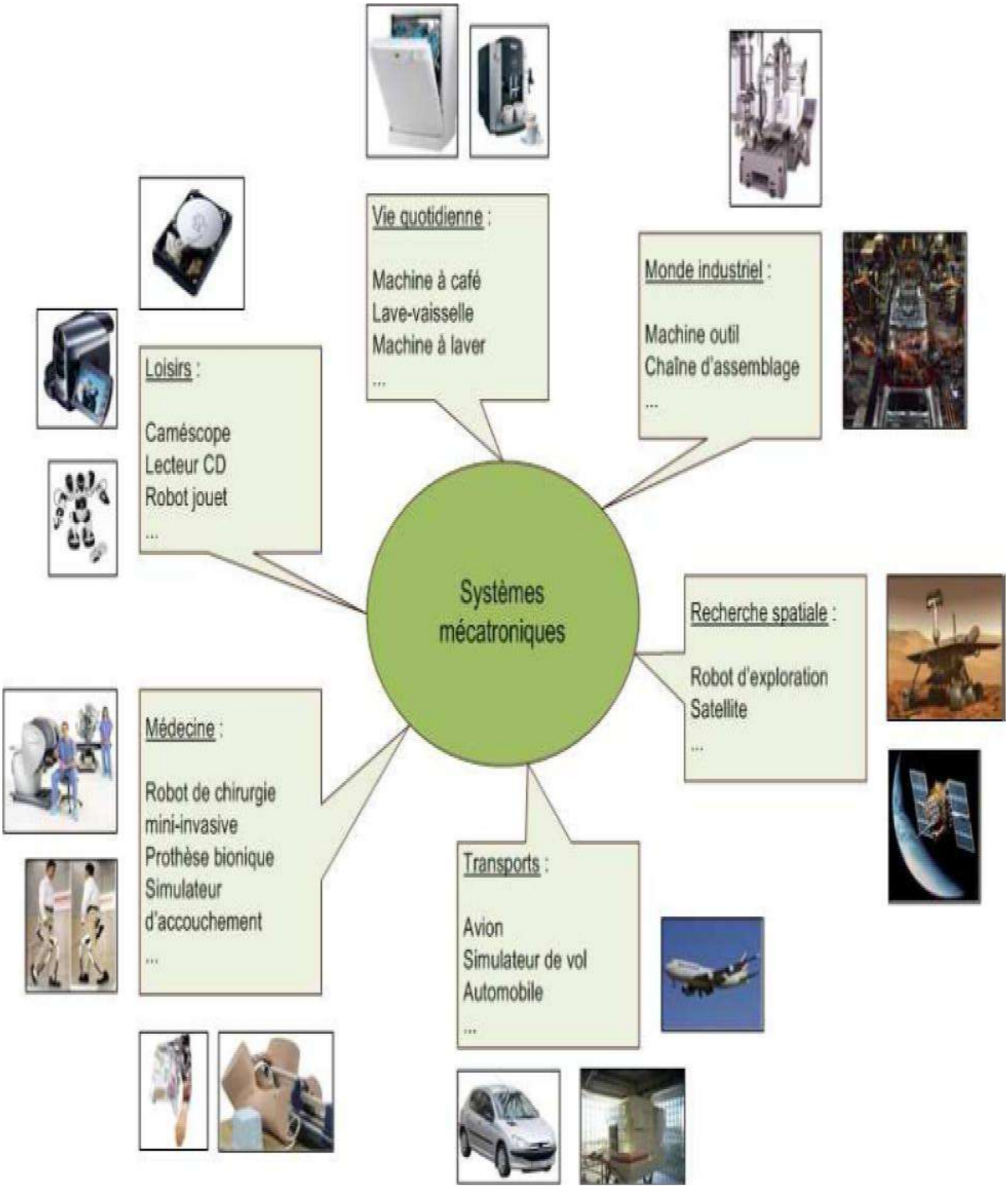


Figure 2 . Exemples des systèmes mécatroniques

En quelque sorte, la mécatronique permet de rendre le système « intelligent » et d'envisager ainsi de meilleures performances voire même des nouvelles fonctionnalités.[1]

La mécatronique vue comme l'amélioration de performances… L'exemple des lecteurs CD pour voiture est illustratif de la manière dont la Mécatronique peut améliorer les performances d'un système, en effet, auparavant, pour empêcher que les vibrations du véhicule n'endommagent la tête de lecture, les lecteurs disposaient en général d'un système de suspension mécanique de type ressort et amortisseur.

Mais ces systèmes nécessitaient alors un poids et un encombrement plus importants que ce qui est autorisé par les contraintes de conception actuelles.

Aujourd'hui, certains fabricants ont utilisé la mécatronique pour contourner ce problème : exempts de suspension mécanique, ces nouveaux lecteurs sont insérés dans un boîtier mécanique à très faible jeu et dus aux vibrations sont diminués par l'ajout d'une amplification dans le domaine des hautes fréquences et d'un meilleur asservissement de suivi de piste.

….ou Comme l'apport de nouvelles fonctionnalités Parallèlement aux avancées technologiques, si la mécatronique connaît aujourd'hui un essor important, c'est aussi parce qu'elle permet d'innover et donc de faire face aux nouvelles contraintes de conception en termes de confort, de sécurité et d'environnement.

Tout système doit aujourd'hui être conçu le plus rapidement et le moins cher possible tout en satisfaisant des contraintes toujours plus strictes et nombreuses.

L'évolution des véhicules est un exemple marquant de cet environnement de conception complexifié.

Dans le cas de l'automobile et récapitule ainsi bon nombre des nouvelles fonctionnalités rendues disponibles par la mécatronique Figure.3.

Celles-ci portent notamment sur l'aide à la conduite et l'assistance au conducteur, aide au freinage (ABS), régulation du comportement dynamique (ESP), régulateur et l'imitateur de vitesse,. . . La tendance générale vise même à remplacer les systèmes purement mécaniques par des systèmes Mécatroniques de type « X by wire » (« drive by wire »,

« brake by wire »,...), voire à concevoir des véhicules hybrides couplant moteur thermique et moteur électrique.

À ce sujet et dans un cadre plus général, une description intéressante des tendances technologiques actuelles et de l'évolution pressentie des systèmes mécatroniques est dressée

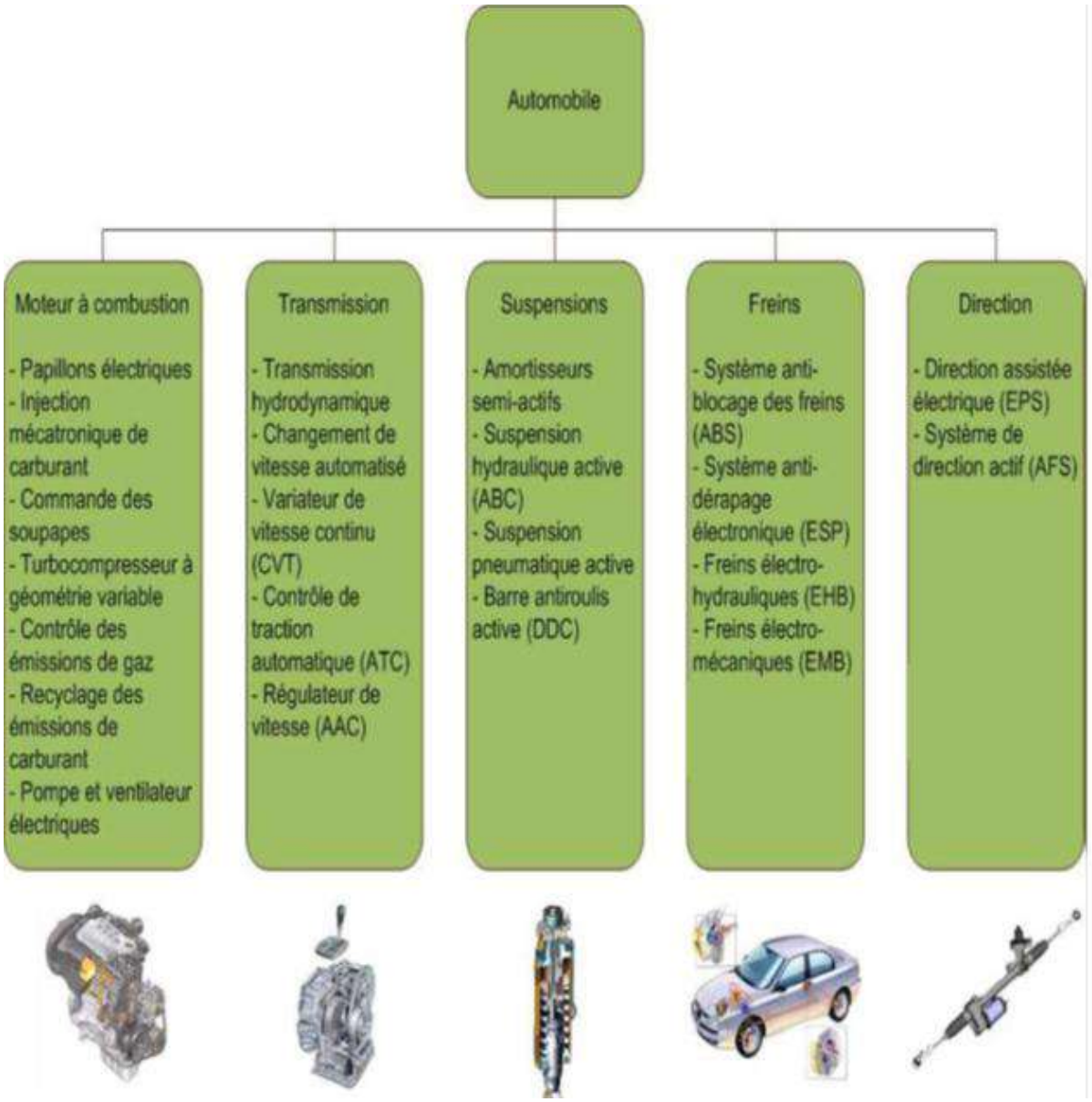


Figure .3 – Évolution de l'automobile grâce aux systèmes mécatroniques

1.5. Caractérisation des systèmes mécatroniques :

Les systèmes mécaniques se sont enrichis au cours du temps de composants non mécaniques, comme par exemple des composants électriques ou électroniques.

Un système mécatronique est donc, au départ, un système **mécanique** enrichi des fonctions offertes par les technologies de l'**électronique**, de l'**automatique** et de l'**informatique** , en particulier les fonctions de captage, de traitement et de communication de l'information, de manière à percevoir son milieu environnant, à communiquer et à agir sur ce milieu, en présentant un niveau complet d'intégration mécatronique, du point de vue fonctionnel et physique.

La démarche inverse, c'est-à-dire l'électronique ou l'informatique qui s'enrichissent de la mécanique, est une voie plus nouvelle qu'il convient également de souligner car porteuse d'innovations, comme par exemple les jeux vidéo et plus largement les applications de la réalité virtuelle qui comportent des interfaces mécaniques pour « augmenter la réalité »(la pratique virtuelle de sports comme le tennis, le golf... les simulateurs de conduite en constituent des cas d'application bien connus).

Dans un premier temps, on pourrait caractériser le système mécatronique par les couplages qui existent entre les grandes fonctions supplémentaires qu'il offre par rapport à un système mécanique, qui sont celles liées aux interfaces avec l'environnement extérieur.

- mesurer.
- penser.
- agir.
- communiquer.

Ainsi quatre axes d'analyse et d'investigation sont envisageables, concernant les éléments physiques :

- capteurs.
- actionneurs.
- unités de traitement.
- interfaces, supports de ces fonctions.

Mais cette caractérisation s'avère cependant insuffisante dans la mesure où certains systèmes n'offrent pas un bouclage complet de ces quatre fonctions (systèmes dits mécatroniques), ou bien que les éléments physiques (capteurs, actionneurs) présentent des limitations (système avec un degré de couplage faible), ou encore que les quatre fonctions sont présentes, avec un couplage entre les éléments physiques de ces quatre fonctions mais avec une prise en compte faible des interactions avec les éléments mécaniques(système mécatronique faible), ou enfin que l'ensemble des fonctions et éléments physiques sont effectivement couplés dans une démarche d'intégration fonctionnelle et physique (système mécatronique fort).

Voir tableau **1**

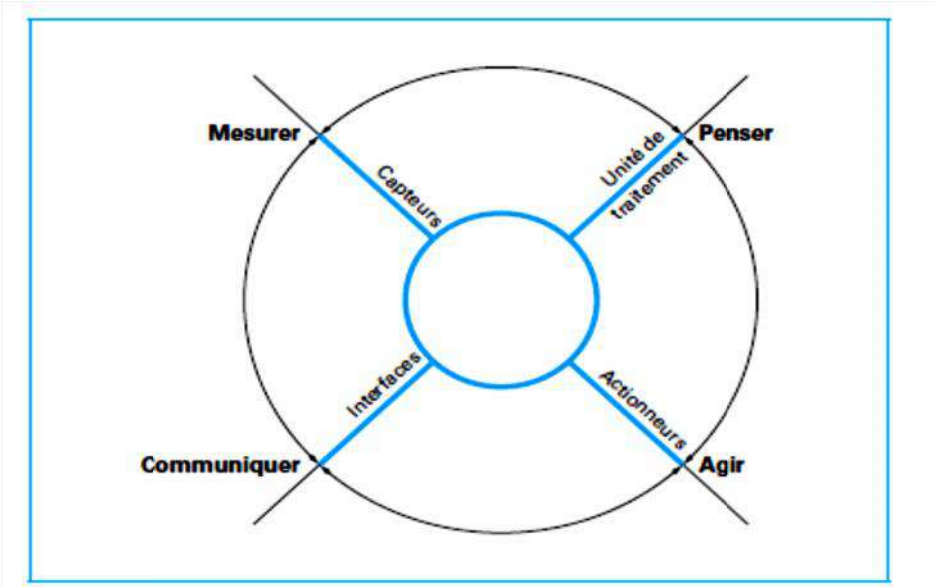


Figure .4 – Schématisation des grandes fonctions supplémentaires offertes par un système mécatronique et des éléments physiques correspondants

Système	La caractéristique
Système dits mécatroniques	Le bouclage n'est pas complet (au moins une des quatre fonctions est absente).
Systèmes ou le degré couplage est faible	Dans ce cas, si on doit tenir compte des limitations des capteurs et des actionneurs, on peut considérer que les capacités de l'unité de traitement ne sont pas limitées.
Systèmes mécatroniques faibles	Dans ce cas, il existe un couplage fort entre éléments constitutifs relevant des quatre grandes fonctions, mais le couplage avec la partie mécanique est faible. Il y a néanmoins nécessité d'une approche d'intégration.
Systèmes mécatroniques forts	Toutes les composantes sont intégrées et présentent des couplages forts entre-elles. Ce sont donc des systèmes fortement couplés où la complexité est due à la miniaturisation du système et aux interactions avec la partie mécanique (vibrations, température...). Au-delà de l'intégration, on entrevoit une véritable volonté de fusionner les éléments physiques.

Tableau 1 – Caractérisation des systèmes

- dans le cas des **systèmes dits mécatroniques** ou des systèmes avec un couplage faible entre les éléments physiques, la conception s'appuie la différence réside dans la démarche de conception utilisée : sur une démarche plutôt classique, par découpage du produit en sous-systèmes.

Dans ce cas, il s'agit le plus souvent de composants mécatroniques qui présentent un niveau d'intégration partiel.

- dans le cas des **systèmes mécatroniques faibles ou forts**, la démarche est novatrice et implique une approche système nécessitant un processus d'intégration fonctionnelle et physique.

Il s'agit dans ce cas de véritables systèmes mécatroniques qui présentent un niveau d'intégration complet.

La densité de couplages présents dans le système mécatronique apparaît en conséquence comme un facteur déterminant de celui-ci par rapport aux systèmes non mécatroniques.

Dans les systèmes mécatroniques, le concepteur cherche à favoriser les couplages de technologies en synergie. [2]

1.6. L'avantage de la mécatronique :

Les entreprises qui appliquent les bonnes pratiques de la mécatronique constatent des avantages significatifs.

Les entreprises les plus performantes sont davantage capables d'atteindre leurs objectifs de coûts de développement, de revenu et de qualité des produits, mais aussi de respect des dates de lancement des produits. Elles peuvent également :

• ajouter davantage de fonctionnalités et de fonctions.
• diminuer la taille, le poids et le coût de leurs produits.
• améliorer leur efficacité générale.
• exploiter pleinement les commandes adaptatives et les diagnostics pour améliorer la fiabilité et réduire les coûts de maintenance.
• personnaliser ou mettre à jour leurs produits en reprogrammant les microprogrammes incorporés. En outre, la mécatronique atténue les risques et résout les défis classiques de la conception, tels que la lenteur du processus de conception de machines en série, l'insuffisance des communications entre les ingénieurs et les clients, ou encore la dangerosité des tests physiques des machines. [3]

1.7. Conclusion :

Les systèmes mécatroniques sont de plus en plus utilisés dans l'industrie. Tous les secteurs sont concernés : l'automobile, l'aéronautique, le nucléaire, le spatial et même des domaines comme le bancaire ou le médical. le développement d'un système mécatronique est envisagé selon l'approche de l'ingénierie concourante dans le cadre d'un cycle de développement. La complexité importante de systèmes mécatroniques et la réduction des coûts de conception et d'exploitation incitent les industriels à maîtriser davantage la sûreté de fonctionnement. Afin d'optimiser le développement des systèmes complexes, des méthodes sont utilisées dans chaque étape du cycle de développement pour analyser la fiabilité. L'ensemble de ces méthodes constitue un processus à part entière : le processus de fiabilité. Les principales méthodes d'analyse de la fiabilité ont été comparées entre elles. Une classification de ces méthodes par rapport à chaque phase du cycle en V a montré que les méthodes utilisées dans les étapes descendantes du cycle de développement sont plutôt qualitatives, alors que dans les étapes montantes elles sont, en plus, quantitatives.

Chapitre 02

Conception d'un système mécatronique

2.1.Introduction :

La mécatronique fait référence à l'intégration de systèmes de commande, de systèmes électriques et de systèmes mécaniques. Un système mécatronique n'est pas simplement le fruit d'un mariage entre des systèmes électriques et mécaniques et est davantage qu'un simple système de commande en fait, c'est l'intégration parfaite de tout cela à la fois. Les entreprises les plus performantes sont 2,3 fois plus favorables à attribuer des spécifications de conception aux systèmes comme dit le proverbe, « si vous ne savez pas où vous voulez aller, vous arriverez toujours ailleurs »,de la même manière, lorsque vous développez des produits, vous devez d'abord savoir ce dont vous avez besoin pour avoir une chance d'obtenir le produit final que vous visez,définir dans leurs grandes lignes, les spécifications d'un produit est généralement la première étape nécessaire pour établir les performances de ce produit. La capacitéà convertir ces paramètres clés en objectifs de performances opérationnelles du système et de ses sous-systèmes est souvent ce qui différencie les entreprises les plus performantes des autres.

Nombreuses sont les entreprises qui pensent par ailleurs que mettre en place un seul processus de conception intégré couvrant toutes les disciplines est la meilleure manière de coordonner une conception et une ingénierie pluridisciplinaires, pour que toutes les spécifications du produit soient respectées. Toutefois, les statistiques montrent que tout effort supplémentaire consacré à l'ingénierie de processus l'est finalement en pure perte.Au contraire, les entreprises les plus performantes utilisent des processus de conception distincts selon les disciplines, qui leur permettent d'exploiter pleinement l'expertise de leurs concepteurs dans les domaines qui leur sont propres. Toutefois, ceci implique qu'elles

coordonnent et synchronisent rapidement leurs groupes d'ingénierie ; une synchronisation qui est absolument essentielle.Cette bonne pratique devrait être adoptée par les entreprises qui cherchent à améliorer leurs processus de conception mécatronique,d'un point de vue pratique, elles devront déployer des outils d'ingénierie spécialisés qui permettront à chaque discipline d'exceller, tout en facilitant le partage des informations,pourtant, cela n'est pas suffisant pour modéliser ces systèmes. les performances des systèmes dépendent généralement des besoins disparates de l'ingénierie et de la conception en termes de sous-systèmes,en conséquence, la décomposition d'un système en composants premiers doit être faite de manière formelle,au final, il est essentiel d'établir des processus clairs pour communiquer efficacement les modifications et pour aligner lesoutils de collaboration et d'ingénierie système qui permettront aux équipes de communiquer efficacement ces modifications.

2.2. Système mécatronique :

Ensemble d'éléments en interaction mutuelle et en interaction avec l'environnement, organisés en fonction d'un même but pour parvenir à une même fin.

2.2.1. Définition d'un système mécatronique :

Un **système mécatronique** est un système combinant des technologies qui relèvent des domaines de la mécanique, de l'hydraulique, de la thermique, de l'électronique et des technologies de l'information. Il peut être décomposé en quatre entités en interaction (voir figure 5) : les capteurs, la partie opérative, le système de commande et de reconfiguration et les actionneurs.

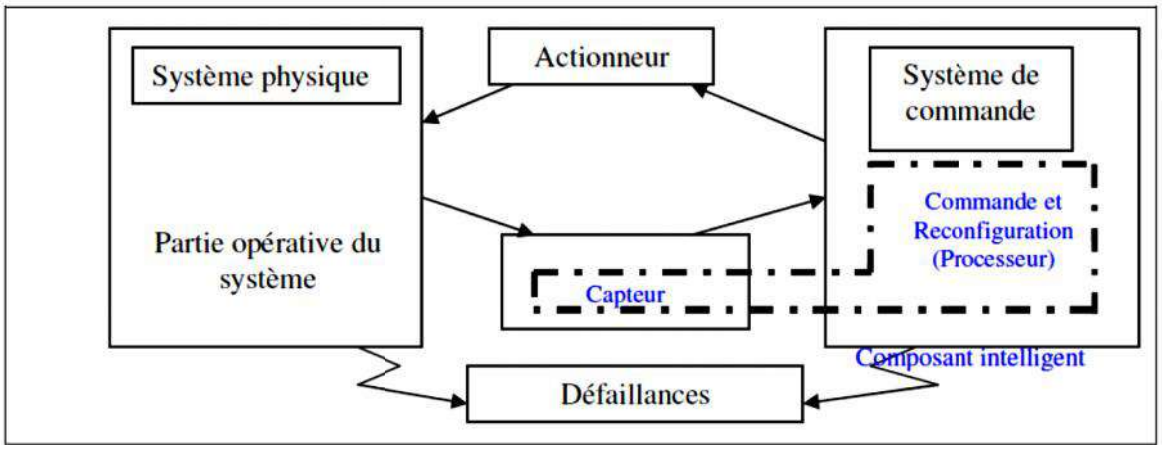


Figure 5. Éléments constitutifs d'un système mécatronique

Les capteurs mesurent des grandeurs physiques continues caractéristiques de la partieopérative. Le système de commande et de reconfiguration établit en fonction de ces mesures les actions à réaliser. Les actionneurs agissent sur la partie opérative. le système de commande a aussi pour objectif d'assurer que certaines grandeurs de lapartie opérative soient maintenues dans un intervalle de sécurité.Lorsque certains événementsrelatifs à la sécurité du système se produisent, comme le franchissement d'un seuil de sécuritépar une variable caractéristique de la partie opérative, des actions sont mises en œuvre defaçon à reconfigurer la partie opérative et à ramener les grandeurs caractéristiques de celle-cidans les limites permises. Les spécificités des systèmes mécatroniques sont liées au fait que :ils sont reconfigurables et la décision de reconfiguration est prise par le système lui-même.

- la réussite des reconfigurations dépend, dans le cas général, de la dynamique continue dela partie opérative, mais aussi du temps de réaction du système de pilotage.

Nous supposerons que le système de commande et de reconfiguration (calculateur) estexempt de fautes. Nous étudierons uniquement l'effet des défaillances des capteurs, desactionneurs et de la partie opérative.[5]

2.2.2. Structure d'un système mécatronique:

Il est important de préciser qu'un système mécatronique est clos et 'intelligent' il a donc besoin de capteurs pour mesurer les valeurs physiques et d'actionneurs pour intervenir sur les grandeurs physiques d'un processus physique / technique,la question essentielle est comment intervenir, et cette tâche est effectuée dans un ordinateur par un programme informatique,la structure générale d'un système mécatronique est donnée par la (figure.6)De cette structure apparaît clairement le contenu essentiel pour une formation professionnelle.

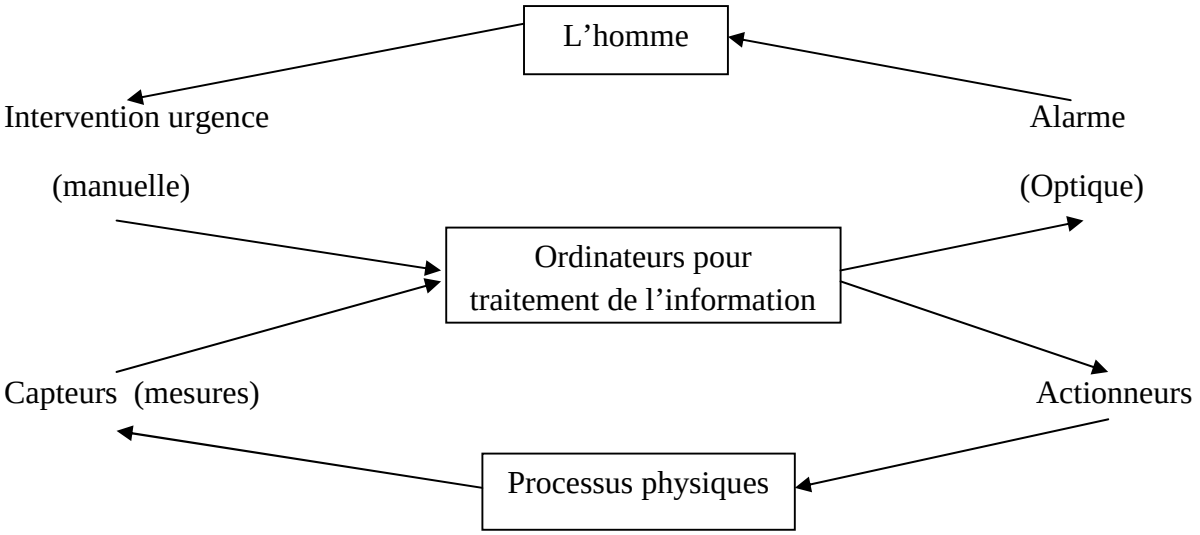


Figure6: Structure de principe d'un système mécatronique

Les processus physiques / techniques sont définis en fonction de l'environnement industriel.

Il peut s'agir de processus chimiques, électriques, biologiques,…. etc. dans le cas présent, il s'agit de processus mécaniques, qui prévalent dans la vie quotidienne. les exemples en sont les robots, les machines-outils, les équipements automobiles, les dispositifs optiques et médicaux, les équipements de fabrication, les machines d'emballage, les machines à insérer les composants, les appareils électroniques grand public, ……etc.les capteurs mesurent des valeurs physiques comme la température, la pression, les tensions, les distances,…... etc. et les traitent électroniquement. Les actionneurs conservent ou changent les états du processus et interviennent par des dispositifs comme les commandes électriques, les commutateurs, les vannes pneumatiques ou hydrauliques,… etc. les ordinateurs sont respectivement des appareils autonomes ou des microprocesseurs à simple puce et des systèmes superviseurs de micro-ordinateurs, qui tournent avec des programmes informatiques sophistiqués, néanmoins l'homme subsiste. il est le facteur présentant le plus de risque dans la structure, suivant la Figure 6, mais demeure nécessaire, car il est le seul élément qui puisse prendre les bonnes décisions dans un état critique du processus. [6]

2.3. L'aspect dynamique hybride des systèmes mécatroniques :

2.3.1. Définition :

Un système dynamique hybrideest un système dont la description nécessite l'utilisation de variables continues et de variables discrètes, ainsi que la prise en compte d'une dynamique continue (variables continues apparaissant sous forme dérivée) et d'une dynamique discrète (changements d'états dus à l'occurrence d'événements), ce qui rend la modélisation hybride indispensable.

Plusieurs modèles dits « hybrides » y sont présentés. Ces modèles peuvent être classés selon deux approches : celle qui intègre, au sein d'un même formalisme, les aspects continus et discrets, dite approche intégrée; et celle qui sépare ces deux aspects en faisant coopérer deux modèles différents,cette dernière est appelée l'approche séparée, l'approche intégréeenglobe tous les modèles issus de l'extension de modèles existants, nous distinguons ceux issus de l'extension de modèles continus comme les bond graph à commutations et ceux issus de l'extension de modèles à événements discrets comme les réseaux de Pétrihybrides.

Les systèmes dynamiques hybrides sont caractérisés par une interaction entre des processus continus et des processus discrets, ce qui rend la modélisation hybride indispensable, les systèmes mécatroniques sont un exemple des systèmes dynamiques hybrides figure 7. En effet, la partie opérative est un processus continu puisque c'est un système énergétique**.** Le système de commande et de reconfiguration, quant à lui, est un processus discret. Les défaillances peuvent également être vues comme un processus discret si on ne s'attache qu'à leur date d'apparition.

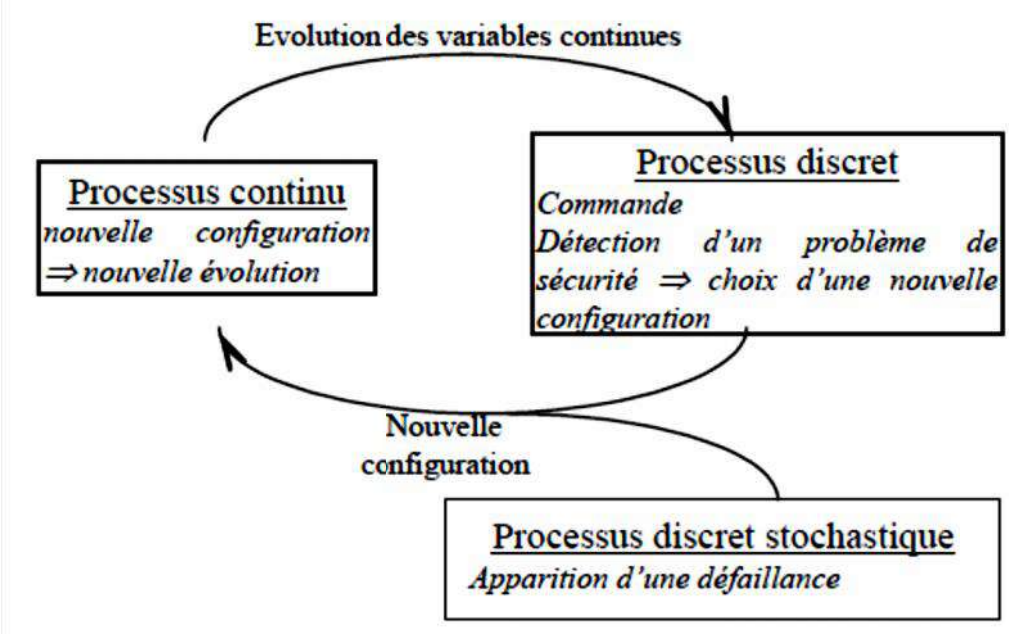


Figure 7. Interaction entre processus continus et discrets dans un système mécatronique

Ainsi nous intégrons la connaissance des conditions d'apparition des défaillances et la réponse du système à ces défaillances dans notre modèle des systèmes mécatroniques. Ces défaillances agissent sur le processus continu et cette dernière joue un rôle important dans la réussite des reconfigurations et dans l'évaluation de sûreté de fonctionnement de ces systèmes.

Dans la section suivante, nous évoquerons les limites des méthodes classiques de sûreté de fonctionnement face à cette nouvelle catégorie de systèmes, et présenterons une panoplie de méthodes de modélisation et d'analyse qui sont mieux adaptées pour les études Sdf de ce type de systèmes.

2.4. La Sûreté de Fonctionnement des systèmes mécatroniques :

2.4.1. Limites des méthodes classiques :

Les méthodes classiques de sûreté de fonctionnement, sont basées sur une représentation logique du système étudié.basées sur la logique booléenne, ces approches sont dites statiques.

En effet, ces méthodes sont bien adaptées à l'étude des systèmes dits à configuration statique, c'est-à-dire des systèmes dont les relations fonctionnelles entre leurs composants restent figées tout au long de leur mission.considérons par exemple la méthode des arbres de défaillance.

Elle ne permet pas de différencier les scénarios comportant des ordres d'apparition d'événements différents, en effet, une séquence d'événements peut conduire à un événement redouté alors que les mêmes événements se produisant dans un ordre différent ou à des dates différentes n'y conduisent pas. De plus, le temps séparant deux événements n'est pas explicitement pris en compte dans la construction du scénario, nous ne peut donc pas représenter les reconfigurations. Enfin, il n'est pas possible de prendre en compte les défaillances temporaires.Un exemple simple et connu, permettant d'illustrer ces limites, est celui du système à deux composants en redondance passive, ces deux composants (**a** et **b**) peuvent tomber en panne en service (défaillances notées respectivement def a et def b) et subir des réparations (notées respectivement rep a et rep b). La commutation d'un composant à un autre est supposée immédiate et fiablel'événement redouté du système est l'absence de service.

En effet, la première séquence conduit à l'événement redouté puisque les deux composants sont simultanément défaillants pendant un certain temps, tandis que le système continue à délivrer un service pendant et après la séquence s2,cet exemple correspond exactement au cas des systèmes avec reconfiguration, si une deuxième défaillance arrive avant la fin de la reconfiguration il y a occurrence d'un événement redouté, dans le cas contraire tout se passe bien, plusieurs extensions des méthodes classiques ont été proposées afin d'élargir leur champs d'application pour prendre en compte le problème que nous venons de mentionner, citons à titre d'exemple les arbres de défaillance avec les portes ' A avant B' ces méthodes restent tout de même fortement combinatoires et incapables de prendre en compte les changements d'états et les reconfigurations dans les scénarios redoutés. dans ce but, d'autres méthodes ont été introduites, comme les diagrammes de séquence d'évènements, afin de permettre une meilleure représentation visuelle des scénarios dynamiques. ils apportent une aide à l'identification et à la constructiond'événements ordonnés dans le temps. des phénomènes tels que les compétitions, les conditions, les synchronisations peuvent être représentés grâce à ce formalisme,bien que les ESD représentent de manière claire les scénarios en compétition, ils ne peuvent pas être générés automatiquement et nécessitent de la

part de l'analyste une définition des états et des transitions. le concepteur doit donc énumérer tous les états de commande et de reconfiguration.Or, dans le cas des systèmes mécatroniques qui sont des systèmes dynamiques hybrides, cela veut dire que le nombre d'états du système est infini si on prend en compte la partie énergétique. Il en est de même pour les méthodes fondées sur les graphes de Markov.

2.4.2. La fiabilité des systèmes dynamiques hybrides :

La fiabilité des systèmes dynamiques hybrides est une discipline relativement récente de la sûreté de fonctionnement. Elle est également connue sous le nom de « fiabilité dynamique » ou encore «probabilistedynamiques » définit cette discipline comme « la partie de la sûreté de fonctionnement qui étudie de manière intégrée le comportement des systèmes industriels complexes affectés par une évolution dynamique continue sous-jacente ». Comme pour les systèmes mécatroniques, le fonctionnement de tels systèmes est régi par deux phénomènes : la variation continue et déterministe des paramètres énergétiques**,** mais aussi par les sollicitations et défaillances des composants du système, de nature discrète et/ou stochastique.

Ces deux phénomènes sont en interaction et leur interaction influence les paramètres de sûreté de fonctionnement tels que la fiabilité ou la sécurité.

Les méthodes classiques de sûreté de fonctionnement, compris les méthodes fondées sur les graphes de Markov sont incapables de prendre en compte de manière satisfaisante la dynamique des variables continues correspondant aux paramètres énergétiques illustrons au travers de quelques exemples les interactions entre les phénomènes continus et les phénomènes discrets et/ou stochastiques et leur influence sur la fiabilité ou la sécurité.Considérons un composant électronique dont le taux de défaillance peut être affecté par sa température. Le fonctionnement de ce composant est caractérisé par trois plages de température.en dessous du seuil T1 = 180°, le taux de défaillance de ce composant est λ1quand sa température dépasse ce seuil mais reste inférieure à T2 = 250°, son taux de défaillance devient égal à λ2 (λ2 >λ1).au-delà du seuil T2, le composant cesse de fonctionner.

On voudrait calculer la fiabilité de ce composant dans un environnement où la température est variable. Il est indispensable de relier cette évolution de la température avec les différents états du composant pour évaluer sa fiabilité. cet exemple illustre l'influence des

paramètres continus sur les paramètres stochastiques des défaillances.pour souligner l'influence des défaillances sur les phénomènes continus, imaginons que ce composant serve à commander un ventilateur qui a pour mission de ralentir la croissance de la température ambiante.

La défaillance de ce composant empêcherait le ventilateur de fonctionner, ce qui contribuerait à accélérer la croissance de la température ambiante.Il s'agit d'un système (réservoir), décrit par une variable continue x (la pression), au sein duquel a lieu un transitoire caractérisé par la croissance rapide de x dans une configuration i =1. Un endommagement de l'installation se produit si x excède la valeur **L**.

Si le seuil **l** correspondant à une valeur d'alerte est atteint, un dispositif de protection est sollicité, avec des probabilités p0 de succès (entrée du système dans l'état i = 2) et de p1 de fonctionnement partiel (p0 + p1 = 1), correspondant à une atténuation moins forte du transitoire (i = 3).

Supposons en outre que le transitoire puisse devenir plus sévère, avant d'atteindre le seuil **l**, par la défaillance supplémentaire d'un autre composant.

Après cette défaillance, qu'on suppose pouvoir se produire uniquement pour des valeurs de x croissantes, le système se trouve dans une configuration i=4 dans ce cas, le dispositif de protection peut encore couper la montée de x s'il fonctionne parfaitement (configuration i =5), mais son mode de fonctionnement partiel (i = 6) n'est plus suffisant pour permettre d'empêcher lapanne du système. Cependant, celle-ci se produit plus tard que dans les configurations i = 1 eti = 4, ce délai laissant une possibilité supplémentaire d'intervention sur le système.[7]

2.5. La conception d'un système mécatronique :

Comme nous l'avons vu précédemment, un système mécatronique est un système mêlant plusieurs technologies issues de l'informatique, del'électronique et de la mécanique au sens large. L'avènement de tels systèmes a certes été rendu possible grâce aux avancées technologiques mais leur besoin est surtout apparu avec la complexité croissante des cahiers des charges et des fonctionnalités ou actions demandées.

2.5.1. De l'ingénierie séquentielle a l'ingénierie concourante :

Même si les systèmes complexes pouvaient utiliser différentes technologies issues de différents domaines de la physique, il s'agissait plus d'une juxtaposition des disciplines que d'une réelle synergie. L'approche globale de conception habituellement adoptée consistait alors à décomposer le système en plusieurs sous-systèmes (chacun étant relatif à une discipline propre) et à étudier ces sous-systèmes de manière séparée.

Ce point de vue traditionnel a ainsi abouti à ce que nous pouvons appeler l'ingénierie séquentielle où les sa voir faire technologiques des spécialistes sont relativement cloisonnés (approche dite également approche métier).Depuis l'avènement de la mécatronique, il s'agit désormais de savoir intégrer les différentes technologies afin qu'elles interagissent entre elles de manière optimale. , le découpage par discipline scientifique ne permet justement plus de répondre à cette exigence: tout optimaux que soient les Sous-systèmes par rapport à leur propre discipline, rien ne garantit que leur association sera optimale. En effet, à partir des propriétés des différentes parties, il n'est pas trivial de déduire le comportement del'ensemble et donc d'en assurer son efficience maximale.dans l'approche conventionnelle, même si chacun des spécialistes travaille de la manière la plus efficace possible, son isolement fait qu'il ne possède qu'une idée partielle de la conception du système global et engendre ainsi potentiellement des problèmes d'interfaçage avec les autres sous-système ,Une combinaison des différentes technologies ne peut être optimale que si une réelle communication entre les différents spécialistes est mise en place et si l'interconnexion des différentes disciplines est prise en compte dès le processus de conception.L'évolution des systèmes à concevoir nécessite donc également un changement de méthode de conception. C'est à ce titre notamment qu'est apparue la notion d'ingénierie concourante. Parfois dénommée ingénierie simultanée, approche mécatronique ou encore approche système, cette nouvelle démarche est principalement basée sur la communication des différents partenaires du projet.

Des équipesplurisdisciplinaires composéesd'ingénieurs aux compétences transverses pilotent les équipes métiers plus spécialisées. Ils assurent ainsi un dialogue permanent et garantissent la cohérence des différentes études.Un tel dialogue permet de prendre en compte dès la conception les différentes phasesdu cycle de vie du système (comme la fabrication, la maintenance,...) et d'envisager dessolutions innovantes qui, avec l'approche séquentielle, n'auraient jamais été envisagée(e.g). roulements de roue avec mesure intégrée de la vitesse de rotation, les différentes études sont menées autant que possible en parallèle afin de limiter

lesrisques de conflit lors de l'interfaçage des différentes technologies et donc de réduire lesphases de préconception.

déjà appliquée dans de nombreuses industries, cette approche connaît un succès grandissant et bon nombre de références peut être trouvé dans la littératureà ce sujet .

2.5.2. Le cycle de conception en V :

En parallèle de cette notion d'ingénierie concourante, focalisons-nous désormais sur ledéveloppement même d'un produit mécatronique, c'est-à-dire sur les étapes aboutissant àla production du produit à partir des besoins exprimés.

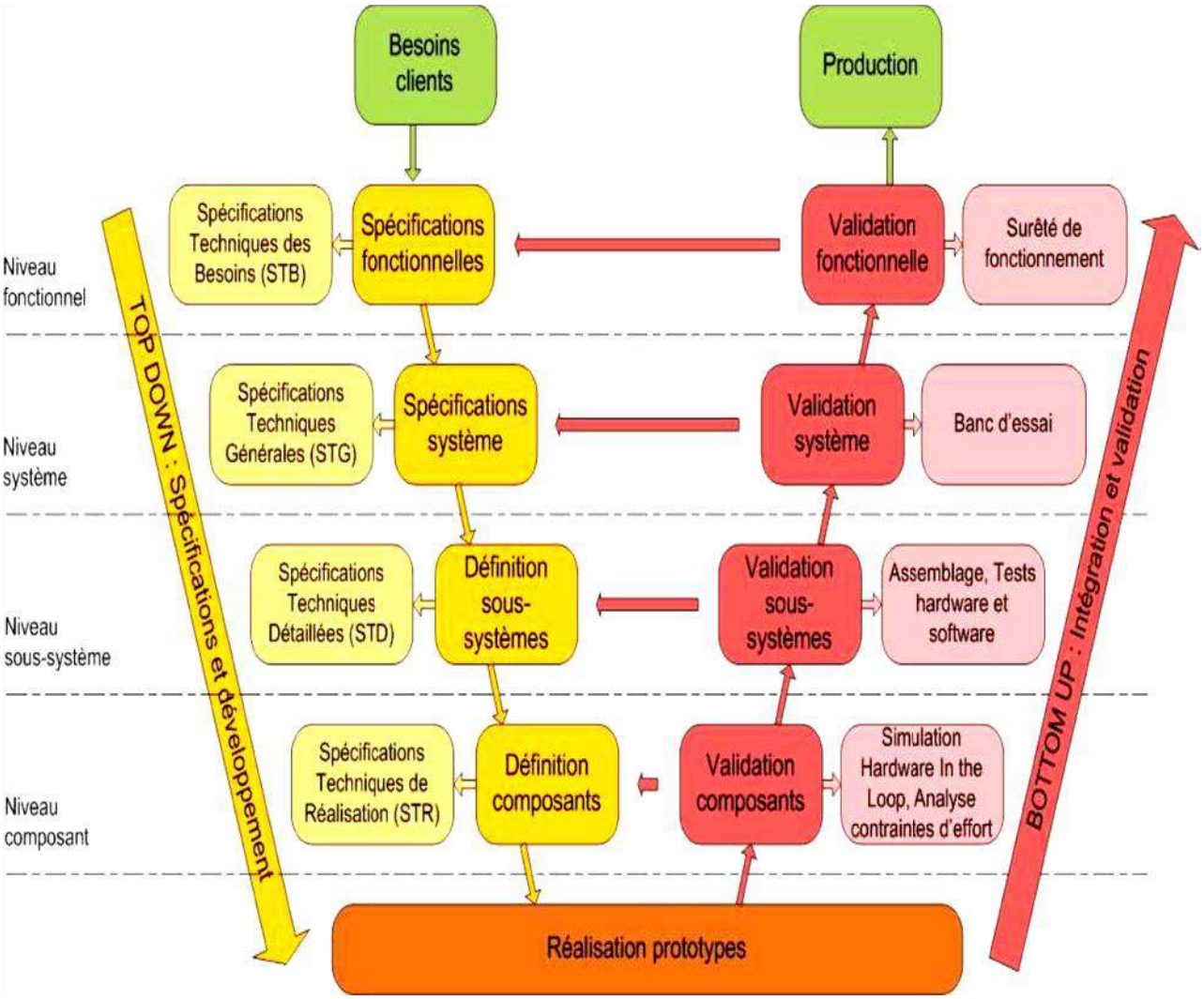


Figure.8 .le cycle de conception en v

Aujourd'hui, les spécialistes de la conception de systèmes mécatroniques s'accordent à représenter leur démarche sous la forme d'un « cyclène V », ce cycle est repris ici dans le cas d'un système mécatronique Figure8. Celui-ci est constitué de deux branches principales: la phase descendante correspond aux différentes phases de spécifications et de conception tandis que la phase ascendante représente les étapes de validation et d'intégration des différentes technologies.

Le projet est décomposé en plusieurs sous-projets de différents niveaux :

Dans le cycle de conception, différentes représentations du produit mécatronique doivent être établies et exploitées, la construction et l'exploitation des modèles constituant ce qu'on appelle la démarche de modélisation.le modèle peut avoir plusieurs formes, textuelle, graphique, physique et être décrit à l'aide d'un langage naturel, graphique ou informatique.

NOTE 1 :lorsque le produit mécatronique est lui-même constitué de produits et/ou composants mécatroniques la même démarche s'applique à ces derniers.

L'exploitation de ces modèles dans une phase de simulation doit permettre de valider et d'optimiser les options technologiques à mettre en œuvre. la cohérence entre ces modèles doit être assurée.

NOTE 2 :l'utilisation d'un modèle unique suffisant pour décrire complètement le produit est généralement impossible pour les produits mécatroniques. le formalisme de description associé au modèle dépend du niveau de représentation choisi.

Trois niveaux de représentation doivent être mis en œuvre pour la description d'un produit mécatronique.

a) Le niveau fonctionnel : description des fonctions générales du produit mécatronique et des fonctions associéesaux différents modes de fonctionnement avec leurs stratégies de déclenchement respectives.

C'est à ce niveau que doit être réalisée l'analyse fonctionnelle.

NOTE 3 :la description du modèle se fait souvent sous forme textuelle (cahier des charges fonctionnel) ; elle peut aussiutiliser des langages « orientés objet » comme UML ou Sys ML

b) Le niveau architecture (aussi appelé niveau logique, et parfois décomposé en deux sous-niveaux, les niveaux système et réseau) : description macroscopique du produit mécatronique, du comportement de ses constituants interconnectés par des flux de puissance et d'information, et des lois de commande.

NOTE 4 :la description du modèle peut se faire sous forme de blocs diagrammes, de graphe des liaisons (Bond Graph) ou de « modèles multiports » (« port based model »).

La description peut aussi recourir à des langages informatiques comme MODELICA ou VHDL-AMS notamment pour les parties électroniques.

NOTE 5 :les spécifications des constituants sont établies en fonction des données de sortie des niveaux fonctionnels et architecture, pour alimenter le niveau de définition.

c) Le niveau de définition (aussi appelé niveau géométrique, physique ou topologique) :

description fine des différents constituants d'un produit mécatronique et de leur intégration (interconnexion, assemblage, câblage,…) nécessaire à sa réalisation (géométrie 2D ou 3D, comportement des matériaux, nomenclature, routage de cartes, plan de câblage, programme source,….. etc.).

NOTE 6 : la description du modèle se fait sous forme de dessins, graphiques, notes de calcul, organigrammes ou fichier d'échanges de données. [9]

2.6. Le prototypage virtuel :

Pour faire face à la concurrence accrue des marchés et à la dimension économiqueactuelle, il est important de pouvoir rendre disponible un produit amélioré dans les plus brefs délais. Il est donc capital de réduire au maximum les temps de développement d'un produit. cependant, s'il est vrai que les équipes pluridisciplinaires essaient d'anticiper au mieux les problèmes d'interfaçage entre les différentes technologies, nous avons vu précédemment qu'il est impossible de tout prévoir et que des phases de correction et de validation sont inévitables. Si la démarche de conception restera donc toujours itérative, un moyen de limiter les temps de développement est donc de réduire au mieux la durée dechaque itération, c'est-à-dire de chaque enchaînement spécifications → conception →validation→ correction.

c'est notamment à cette fin qu'est récemment apparue l'utilisation du prototypage virtuel dans les bureaux d'études.

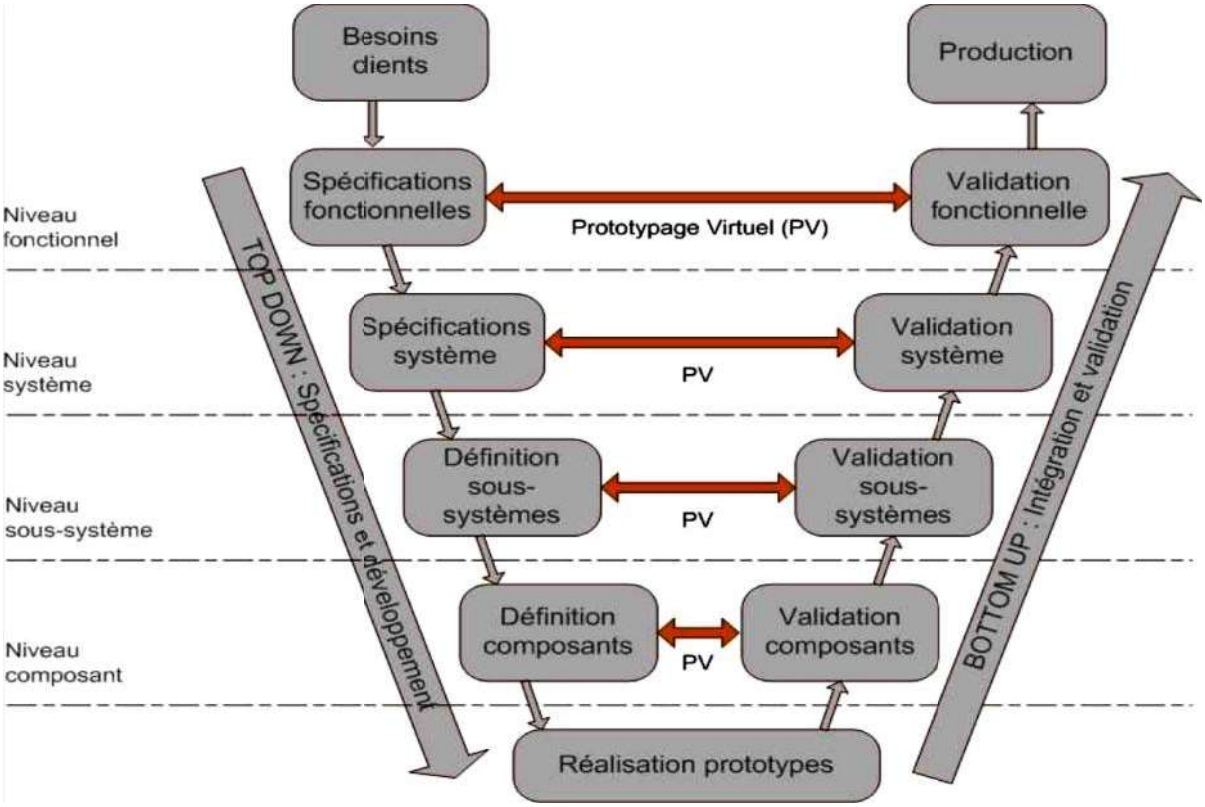


Figure 9. Intérêt du prototypage virtuel dans le cycle de conception en V

En effet, réaliser des simulations permet d'éviter la fabrication de nombreux prototype set favorise ainsi un gain de temps et d'argent. même si la fabrication d'un prototype réelne pourra être évitée pour les tests finaux, cette approche par simulation permet d'enchaîner très rapidement les phases de conception et de validation et ce par les mêmespersonnes. des passerelles se tissent alors entre les deux branches du cycle en V Figure. 9 ,et augmentent la réactivité des équipes.

Le gain de temps et donc d'argent que permet le prototypage virtuel n'est pas uniquementthéorique. Il se vérifie dans la pratique. M argolis montre notamment sur deux cas industriels (système d'isolation vibratoire pour cabine de camion et tympanomètre, outil médical déterminant la santé d'une oreille interne) comment des erreurs de mauvaise

conception auraient pu être évitées grâce à la modélisation et à la simulation...impliquant diffèrent niveaux d'abstraction…

Cependant, le prototypage virtuel n'est vraiment efficace que si l'ingénieur en chargede l'étude est capable de modéliser le système avec pertinence, c'est-à-dire s'il est capablede le décrire à un niveau de granularité cohérent avec son problème de conception.

Ceci estd'autant plus difficile qu'un niveau de modélisation ou niveau d'abstraction est souvent àl'interface de deux niveaux de conception ou niveaux de développement comme le montrela (figure10).

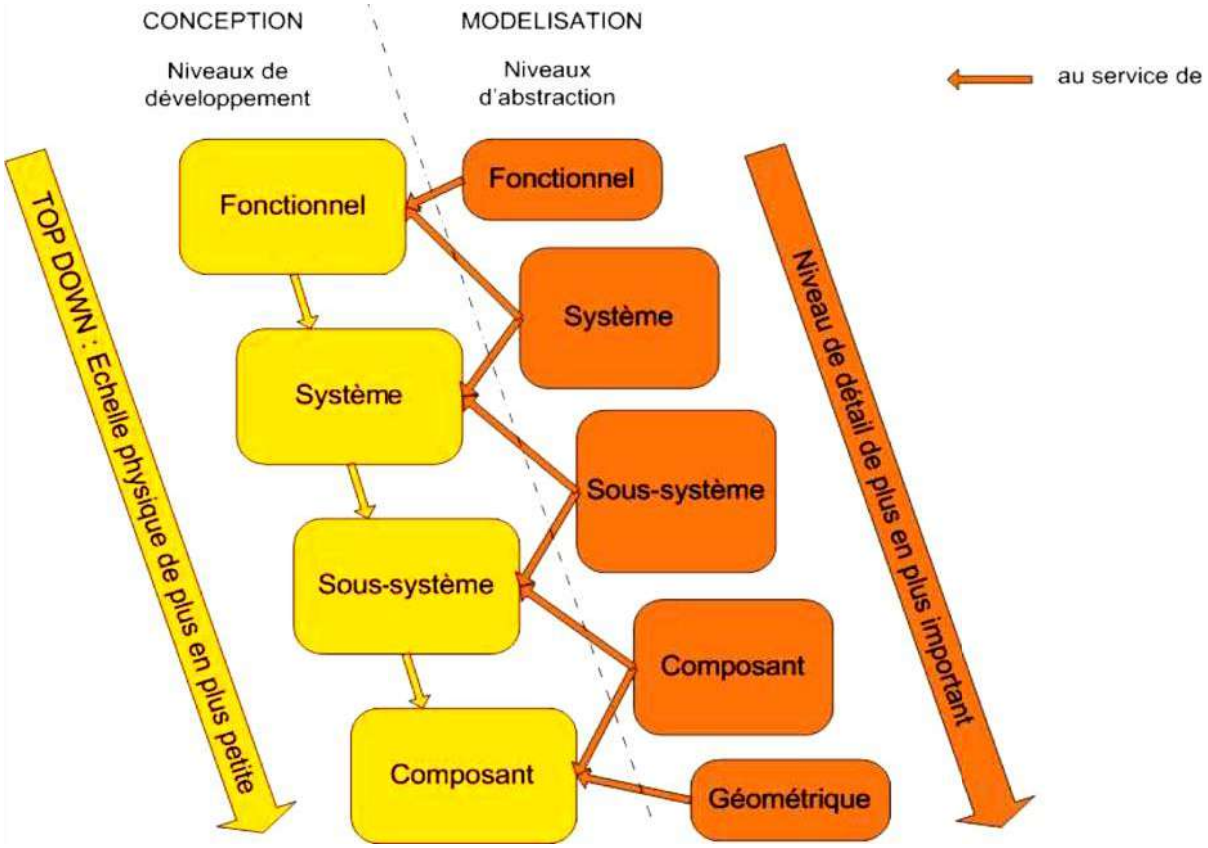


Figure. 10niveaux d'abstraction correspond à plusieurs niveaux de développement

Quel que soit leur niveau d'abstraction de la réalité, ces modèles peuvent revêtir diversesformes telles que sémantiques, graphiques (e.g. schémas électriques, hydrauliques,modèles bond graph, schémas blocs,...), analytiques (e.g. modèles d'état, matrices detransfert,...), algorithmiques ou apparaître encore sous la forme de fichiersde données (e.g. cartographies). Deux types de modèles peuvent cependant être différenciés selon la manière dont ils ont été déterminés :

– les modèles de représentation dont les paramètres peuvent n'avoir aucun sens physiqueconnu.ils permettent de décrire certaines évolutions de certaines variables du processus dans un domaine particulier. ils sont bien souvent obtenus par expérimentationsur système physique existant.

– les modèles de connaissance dont les caractéristiques et les équations associées ontété établies en faisant appel à des modèles plus généraux mettant en œuvre les lois de la physique, de la chimie, de la biologie, …etc.

Les grandeurs associées à cesmodèles ont, par construction, une interprétation physique directe (e.g. température,pression, courant, accélération, force,...).

2.7. La conception de la chaine d'actionnement :

Les sections précédentes nous ont permis d'aborder jusqu'à présent la conceptiond'un système mécatronique d'une manière assez générale.on nous pue vous acter deux phases principales

– une phase portant sur la conception de la partie opérative du système, c'est-à-direportant sur la conception de ce que nous avons appelé la chaîne d'actionnement.

– et une phase permettant de déterminer et d'implémenter les lois de commande pour piloter le système.

Conformément au principe de l'ingénierie concourante et du cycle de conception en V, cesdeux phases peuvent être menées en parallèle : une fois l'architecture du système décidée, la conception de la partie commande se base sur des modèles simplifiés régissant lescomportements dynamiques de chaque sous-système, tandis que ces mêmes modèles sontraffinés pour la conception de la partie opérative (les modèles de commande négligentbien souvent certaines dynamiques nécessaires pourtant au dimensionnement de la

chaîned'actionnement)des étapes de validation propres à la branche ascendante ducycle en V permettront ensuite de valider la robustesse des lois de commande par rapportau comportement réel du système.

La suite portera uniquement sur la conception de la partie opérationnelle d'un système mécatronique (Figure. 11) et se référera donc uniquement aux niveaux de développement système, sous-système et composants (Figure. 11).les modèles étudiés seront supposés être des modèles à paramètres localisés.le dimensionnement géométrique descomposants ne sera, quant à lui, pas traité. dans les sections suivantes, les différents types de problèmes d'ingénierie rencontrés lors de la conception de la partie opérative du système sont décrits et les besoins versde nouveaux outils de modélisation sont ensuite exprimés.

Enfin, quelques démarchesclassiques propres au dimensionnement de la chaîne d'actionnement sont discutées.

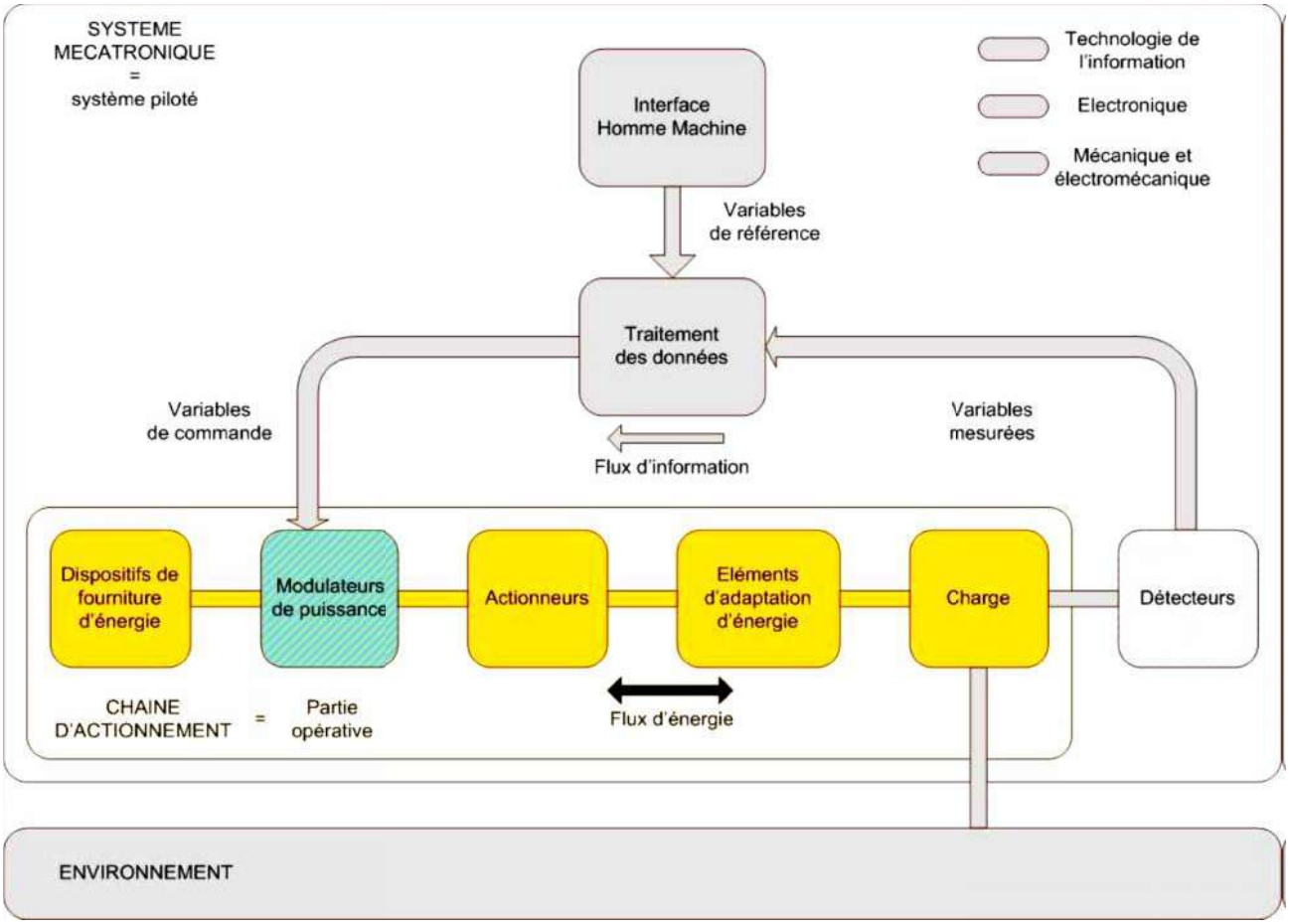


Figure 11 – Partie de la conception traitée dans le mémoire

2.8 Les différents problèmes de conception :

Selon le niveau de développement du projet, la conception de la partie opérative d'unsystème mécatronique peut revêtir plusieurs aspects. que l'étude vise une rupture technologiqueavec l'apport d'une solution innovante ou bien mise sur la reconception d'un objetexistant, la conception d'une chaîne d'actionnement implique souvent l'enchaînement voirel'entremêlement de plusieurs problèmes d'ingénierie qui peuvent être, par exemple, desproblèmes de:

– synthèse d'architecture.

– sélection de sous-systèmes ou de composants sur étagère.

– synthèse paramétrique.

– . . .

Comme nous allons le voir ci-dessous, ces problèmes se distinguent par le type de solutionqu'ils engendrent et le niveau d'abstraction qu'ils requièrent.

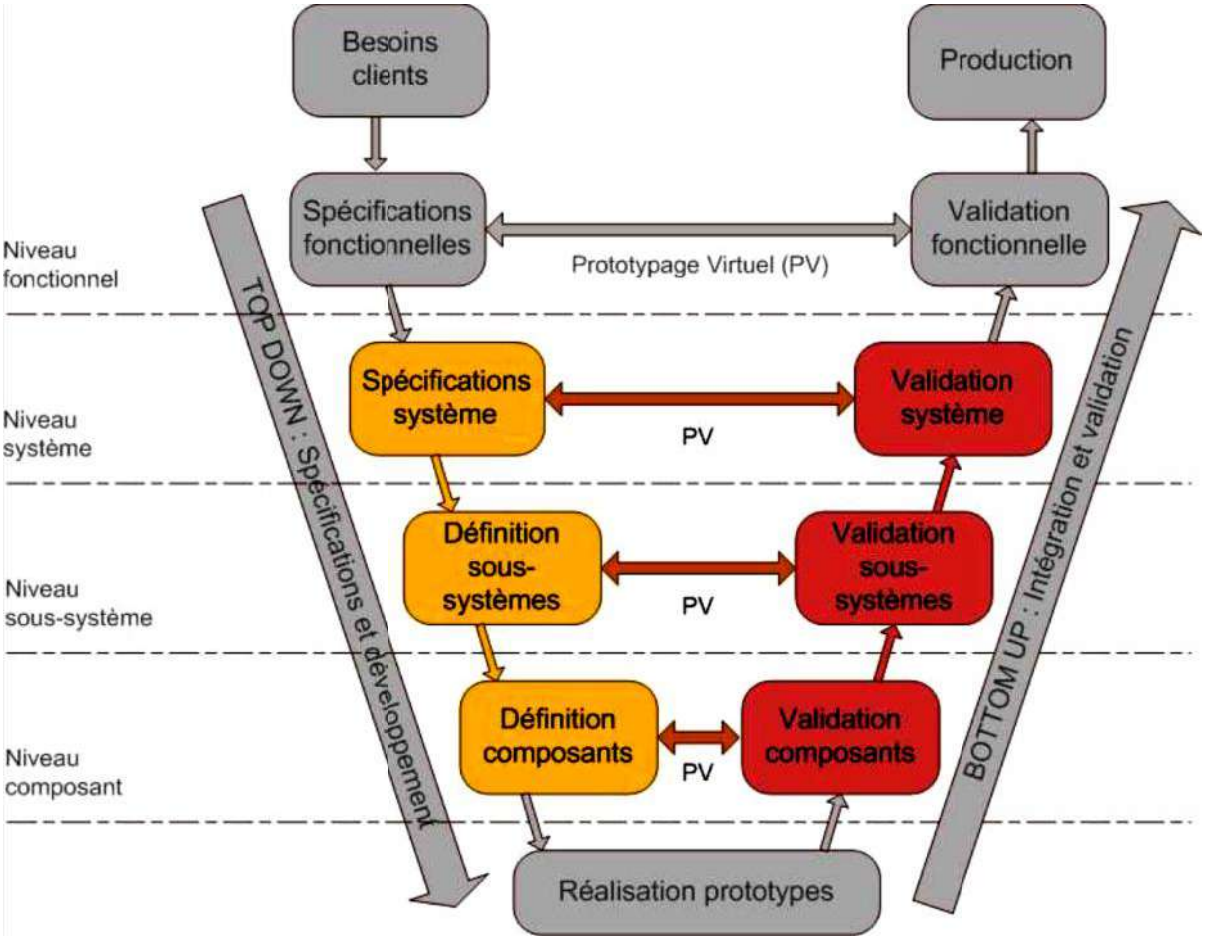


Figure 12 – Niveaux de développement traités dans le mémoire

a. La synthèse d'architecture :

Avant de préciser la conception d'un système (phénomène, géométrie, dimensions), ilconvient de choisir auparavant l'architecture de ce système (lorsque celle-ci n'est pas apriori arrêtée), et ce conformément au cahier des charges. Cette architecture fixe ainsi lenombre, le type et l'agencement de « briques élémentaires » qui permettront de répondre,entre autres, aux aspects fonctionnels désirés. ces « briques élémentaires » sont :

– au niveau de développement système : des sous-systèmes.

– au niveau de développement sous-système : des composants.

– au niveau de développement composant : des phénomènes.

la difficulté des problèmes de synthèse d'architecture réside notamment :

– dans la multiplicité d'architectures candidates à un même cahier des charges.

– d'un choix d'architecture bien souvent fait a priori sans aucune validation.

– et du fait qu'une architecture fixe bien souvent le type de technologie associée etdonc conditionne quelque part les possibilités offertes par les étapes de conceptionultérieures (étape notamment de sélection de sous-systèmes ou de composants).

Pour limiter au mieux ces inconvénients, Rzevski conseille notamment de résoudre lesproblèmes de synthèse d'architecture en réfléchissant d'abord à une association de conceptsavant tout agencement physique (notion de conceptuel design).

Les choix de tels concepts résultent bien souvent d'un compromis entre des contraintes environnementale set des coûts en termes d'études et/ou de fabrication (e.g dans l'automobile, le choixd'une chaîne de traction électrique s'inscrit dans le contexte de la protection de l'environnement mais implique une certaine rupture technologique, malheureusement lourde en investissement).

b. Le problème de sélection de sous-systèmes ou de composants :

Une fois l'architecture fixée, le problème de sélection consiste à choisir dans un cataloguées « briques élémentaires » adéquates pour satisfaire le cahier des charges imposé.en réalité, dans ce type de problème, les données sont la charge actionner et les objectifs que cette charge doit accomplir (données fixées par le cahier descharges) tandis que les inconnues sont :

– au niveau de développement système : les sous-systèmes de la chaîne d'actionnement tels que dispositifs de fourniture d'énergie, modulateurs de puissance, actionneur set éléments d'adaptation d'énergie.

– au niveau de développement sous-système : les composants de chaque sous-système.

ce type de problème intervient généralement dans des phases de préconception, d'étudesde faisabilité du système ou bien lorsque le concepteur ne souhaite pas redévelopper certaines parties existantes qui pourraient a priori convenir. selon le niveau de développement considéré, les critères de sélection reposent principalement sur des calculs statiques jugés dimensionnant et sur les caractéristiques techniquesde chaque « brique élémentaire ».dans la suite de ce mémoire, nous ferons référence, par abus de langage, au terme.dimensionnement pour désigner un problème de sélection de sous-systèmes ou de composants.

c. synthèse paramétrique :

Les problèmes de synthèse paramétrique sont exprimés au niveau de développement composant. ils consistent à déterminer, pour des spécifications données, un ou plusieurs paramètres apparaissant dans le modèle d'un composant de la chaîne d'actionnement.

la structure des modèles de composants est ainsi fixée et leurs commandes sontsupposées connues. ce type de problème intervient généralement lors de la reconception d'un composant.

2.9 Les besoins en termes d'outils :

Comme nous venons de le voir, la conception d'une chaîne d'actionnement passe parla résolution de plusieurs problèmes d'ingénierie et ce à chaque niveau de développement.Afin de réduire toujours plus les temps d'études, nous avons vu que ces problèmes étaient désormais résolus par simulation. Les concepteurs ont donc besoin de nouveaux outilspour effectuer ces calculs : des outils en termes de langages de modélisation mais aussi entermes de logiciels.

2.10. Les besoins en termes de langages :

Dans un problème de conception par prototypage virtuel, l'une des tâches les plusardues réside dans l'étape de modélisation qui nécessite de :

– trouver un niveau d'abstraction adéquat au problème de conception considéré.

– pouvoir décrire les différents phénomènes mis en jeu dans le système et identifiers'ils relèvent bien du niveau d'abstraction requis.

– représenter de manière unifiée ces différents phénomènes même s'ils appartiennent différents domaines de la physique (mécanique, électrique, hydraulique...).

De fait, la construction d'un modèle n'est pas aisée et il est donc primordial de savoir capitaliser les efforts de modélisation autant que possible. Cette capitalisation peut être entreprise :

– dès la construction du modèle, en essayant de le construire de manière hiérarchisée (association de plusieurs sous-modèles génériques qui seront ensuite affinés pour les besoins du problème de conception considéré ou pour des niveaux de développement ultérieurs ;

– et au niveau du management de projet, par la construction et/ou l'utilisation debibliothèques de modèles.

En effet, une certaine généricité permet une certaine réutilisabilité des modèles tan disque la construction de bibliothèques permet de mutualiser les efforts de modélisation quece soit au niveau des différentes strates du cycle en V (mutualisation à court terme)(Figure.13) ou pour d'autres projets (mutualisation à plus long terme). le retour d'expérience s'en trouve ainsi maximisé.

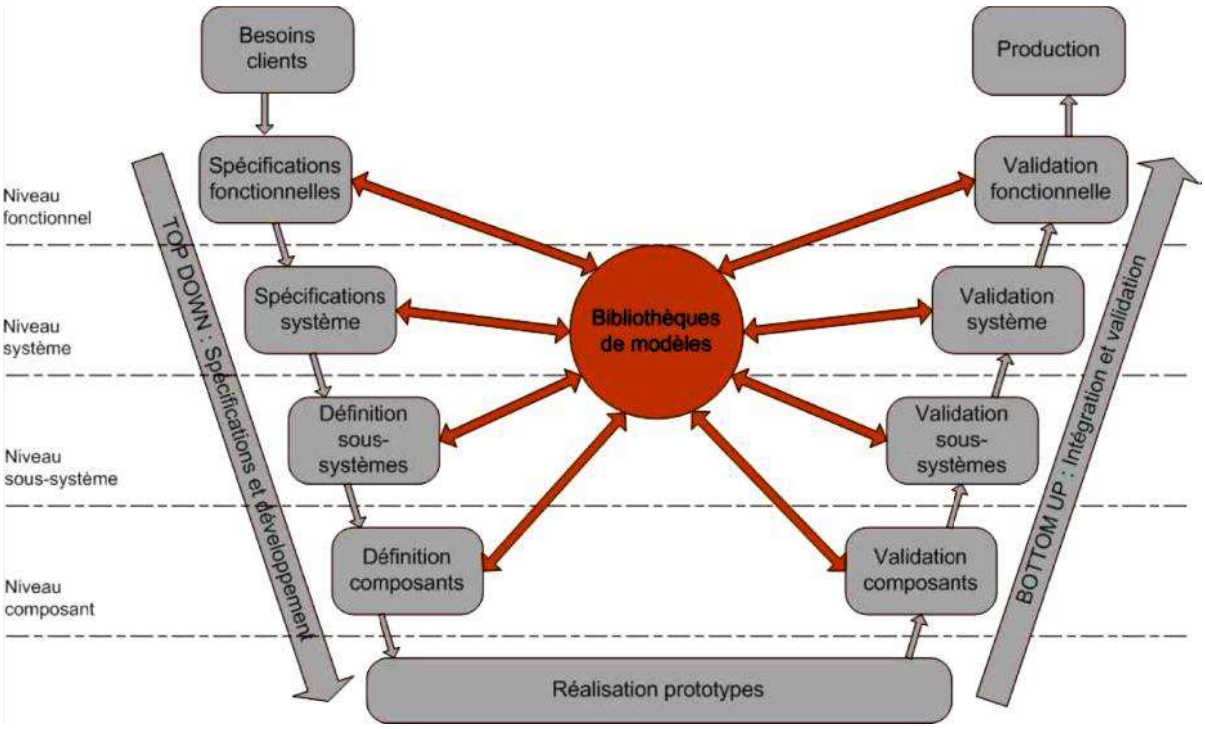


Figure 13 – Capitalisation des efforts de modélisation grâce aux bibliothèques de modèles

Pour appréhender au mieux les difficultés inhérentes à la modélisation et gérer leprincipe de capitalisation, les concepteurs ont ainsi besoin d'un langage de modélisationqui :

– permette de décrire d'une manière unifiée les différents domaines de la physique(mécanique, hydraulique, électrique,...) afin d'intégrer au plus tôt les différents aspects du système.

→ Le langage doit donc être multi-domaine.

– assure une sorte de continuité à chaque étape du projet de conception en facilitant la communication entre les différentes équipes du projet.

- Le langage doit être reconnu comme un standard pour l'échange de modèles.

– optimise autant que possible les temps de conception en facilitant la mutualisationdes efforts de modélisation par la construction de bibliothèques de modèles.

- Le langage doit permettre une approche hiérarchisée tel un langage orienté objet.

– garantisse la réutilisabilité des modèles en permettant la déclaration d'équations apriori non orientées (séparation entre la description de la physique du système etl'objectif de calcul envisagé).

- Le langage doit être acausal.

Dans la pratique,l'utilisation de plusieurs formalismes ou langages reste donc nécessaire.

2.11 Le dimensionnement de la chaine d'actionnement :

Intéressons-nous désormais plus particulièrement au problème de dimensionnement dela chaîne d'actionnement. Comme nous l'avons précisé précédemment, une fois que certaines orientations en matière d'architecture voire de technologie on tété fixées, ce type de problème consiste à comparer puis à choisir les différents composants de la chaîne d'actionnement de sorte que leur association satisfasse les spécifications imposées par le cahier des charges.

Étudions ici la démarche communément suivie dansles bureaux d'étude pour résoudre un tel problème ainsi que quelques uns des critères adoptés pour la sélection des composants.

2.11.1.Méthode essai → erreur → correction :

Par souci de clarté et de concision, considérons ici l'exemple d'une chaîne d'actionnement mono-entrée mono-sortie, constituée simplement d'une charge et d'un actionneur (la transmission d'énergie est supposée directe sans recours à une quelconque adaptation).Supposons alors, par exemple, que le problème soit de dimensionner l'actionneur de sorteque la charge (fixée par le cahier des charges) suive une trajectoire spécifiée (fixée elle aussipar le cahier des charges).

Une fois le modèle de la charge établi, l'approche classique dedimensionnement consiste alors à :

- Sélectionner un actionneur parmi les catalogues d'actionneurs disponibles (ce choixdépend notamment du degré d'expertise et de la connaissance du système que possèdel'ingénieur en charge de l'étude mais aussi de certains critères de sélection plusprécis comme nous le verrons à la section.

- Modéliser l'actionneur ainsi sélectionné.

- Choisir la façon dont va être commandé l'actionneur, c'est-à-dire choisir l'entrée dumodèle {actionneur + charge}.

- lancer une simulation permettant de calculer la trajectoire de la charge.

(i.e. la sortiedu modèle) à partir de l'entrée précédemment choisie.

- comparer la trajectoire ainsi calculée à la trajectoire spécifiée par le cahier des charges.

- recommencer la procédure si la trajectoire calculée n'est pas suffisamment proche dela trajectoire spécifiée (une trajectoire est jugée suffisamment proche si elle satisfaitles critères de précision du cahier des charges).

Schématisée sur la figure 14, cette approche, habituellement adoptée par les bureauxd'études, aboutit rarement à une solution correcte (i.e. en adéquation avec le cahier descharges) dès la première simulation.

En général, la procédure doit être itérée de nombreuses fois et plusieurs phases d'essai, d'erreur et de correction doivent s'enchaîner avantde trouver un actionneur adéquat.

Ceci est d'autant plus vrai dans un contexte de rupturetechnologique où, par définition, les ingénieurs ne peuvent avoir aucune expertise sur lesystème.

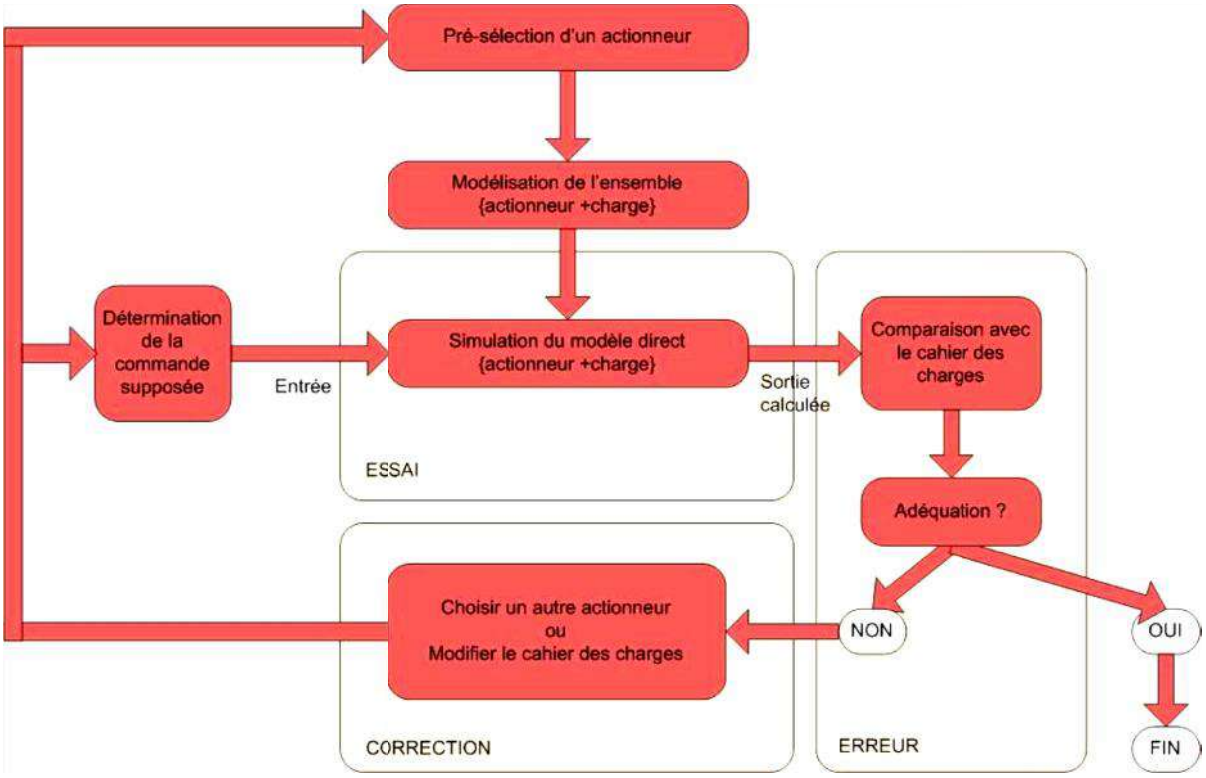


Figure 14. Dimensionnement de la chaîne d'actionnement par modèles directs :

méthode essai → erreur → correction

Puissant mais aucune indication supplémentaire ne lui est fournie pour préciser sonchoix (e.g. doit-il choisir un actionneur plus rapide ou fournissant plus de couple).

Enfin, cette démarche peut même s'avérer sans fin puisqu'après tout, aucune analysen'a été faite pour vérifier que les spécifications peuvent effectivement être atteintes par lastructure du modèle que nous nous sommes fixée (la structure de la charge est imposéepar le cahier des charges mais pas celle du reste de la chaîne d'actionnement).

Dans ce cas,s'il ne trouve pas de solution, l'ingénieur est obligé de diminuer ses exigences en termesde cahier des charges pour résoudre son problème de conception.

2.11.2. Les critères de sélection :

Nous avons vu que la démarche classique pour résoudre unproblème de dimensionnement consistait grossièrement à choisir successivement des composantes à les tester jusqu'à ce que l'un d'entre eux semble pouvoir satisfaire le cahier des charges.

Cette méthode apparaît ainsi très « expérimentale » et le temps de convergence vers une solution adéquate (si une solution est trouvée) dépend essentiellement dela manière dont sont sélectionnés a priori les composants. En réalité, la difficulté d'unetelle sélection tient au fait que les spécifications n'ont été rédigées que pour préciser lesperformances attendues au niveau de la charge et non au niveau de chaque composant.

Voici ici, à titre d'exemples, deux méthodes qui ont été présentées dans la littératureafin de faciliter et de rendre plus pertinent le choix d'un composant.

Ces méthodes sontdécrites ici de manière très succincte.

Le lecteur intéressé pourra consulter les références mentionnées ci-dessous ainsi que la thèse de Fotsu pour un résumé plus détaillé.

a : Méthode de Newton :

L'une des premières études portant sur la sélection de composant est apparue dansles années 50 grâce au travail de Newton

Celle-ci consiste à classifier lesmoteurs par leur inertie mais aussi par les vitesses et les couples maximaux qu'ils peuvent fournir.

Les cahiers des charges sont quant à eux caractérisés par l'inertie de la charge etpar les vitesses et accélérations maximales qu'il ne faut pas dépasser.

Après avoir écritles équations de couplage entre la charge et le moteur, des conditions d'adéquation entrela charge et le moteur sont établies en se basant sur le simple principe que le couple etla vitesse développés par le moteur doivent toujours rester supérieurs au couple et à lavitesse spécifiés pour la charge. L'ingénieur en charge de l'étude obtient ainsi des sélections pour effectuer son choix de composant.

b : Méthode de Coeuillet:

En 1969, Coeuillet reprend une démarche similaire mais cette fois-ci appliquée auchoix d'un groupe motoréducteur pour l'actionnement de radars destinés à la poursuited'objectifs à forte vitesse de défilement. la charge et le moteur sont encore unefois uniquement modélisés par de simples inerties tandis que le réducteur est supposéparfait.

Des conditions d'adéquation entre le groupe motoréducteur et la charge sontalors également établies sur le même principe à la différence que celles-ci s'expriment au niveau des énergies cinétiques W et des puissances instantanées P.

L'originalité de laméthode réside alors dans l'exploitation de ces conditions puisque celles-ci sont traduites sen termes graphiques dans un plan (énergie cinétiqueW, taux de puissance transitoire ˙P) : les zones d'actionneurs non-adéquats, de sous- et de sur-adéquation sont alors clairement identifiées.

c: Discussion des méthodes :

Si les méthodes de Newton Jr et de Coeuillet permettent de sélectionner des composants sur des critères logiques de la physique, celles-ci ne font que guider l'ingénieure charge de l'étude et n'assurent en aucun cas la réussite de son choix. L'établissement desconditions d'adéquation permet certes d'effectuer une première sélection mais celle-ci est relativement grossière et rien ne garantit que, parmi cette sélection, tous les composants seront aptes à satisfaire le cahier des charges.

En réalité, les insuffisances de ces méthodes proviennent du fait que :

– la charge et l'actionneur sont représentés par de simples inerties, modèles qui netraduisent pas la complexité actuelle des systèmes à concevoir ;

– la transmission d'énergie est limitée à la représentation d'un réducteur idéal alorsque, là encore, des architectures plus complexes peuvent intervenir et engendrercertaines limitations pour l'adéquation charge/actionneur.

– les conditions d’adéquation ne sont établies que pour des valeurs maximales, c'est-à-dire que sur des critères statiques obtenus en considérant des situations de vie dites critiques, alors que le comportement dynamique du système peut s’avérer lui bienplus dimensionnant.[10]

2.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, une courte introduction à la Mécatronique a été présentéeet l’architecture générique d’un système mécatronique a été définie comme l’association d’une chaîne d’actionnement et d’une partie commande.

Du fait de leur complexité, nous avons vu que la conception des systèmes mécatroniques était une tâche ardue et qu’elle nécessitait de prendre en compte l’aspect pluridisciplinaire des systèmes dès les premières phases de développement.

Aussi, nous avons également montré comment les concepts d’ingénierie concourante, de cycle de conception en V et de prototypage virtuel peuvent être mis à profit pour réduire les coûts et les temps d’études.

Chapitre 03

Modélisation d'un système mécatronique

3.1. Introduction :

Modéliser, c'est chercher à avoir une vue suffisamment abstraite d'un système physique, pour pouvoir le représenter de façon compréhensible par l'homme, en fonction des objectifs recherchés, le niveau d'abstraction sera différent, en effet, il est important ou cours d'une modélisation de pouvoir s'exprimer à grand niveau de généralité en oubliant les détails non significatifs ou, au contraire, être capable d'enrichir suffisamment la description pour représenter des comportements très précis.

Le choix d'un formalisme de spécification et de conception intégré dans une méthodologie dépendra de plusieurs critères :

- le niveau d'abstraction dans le mode de représentation.

- la capacité d'adaptation aux spécificités des systèmes étudiés.

- le nombre et la nature des méthodes d'analyse fonctionnelle exploitant ce formalisme.

Comme nous l'avons vu précédemment, les systèmes mécatroniques sont constitués d'éléments matériels et logiciels et comprennent à la fois des aspects continus (variables physiques et variables de la partie opérative) et des aspects discrets (variables échantillonnées du système de contrôle-commande, occurrence de défaillance, …).

Le système est en relation permanente avec l'environnement de façon à en acquérir des informations et à interagir sur lui, selon des délais cohérents avec la dynamique du processus physique à commander.

Ces systèmes sont dits réactifs et sont également soumis à des contraintes temps-réels, le choix d'un formalisme de modélisation va donc reposer sur leur capacité à intégrer tous ces aspects.

Néanmoins, l'exploitation d'outils d'analyse et la mise en œuvre des activités de sûreté de fonctionnement requièrent des niveaux d'abstraction ou de raffinement différents. Par exemple, la construction d'un arbre de défaillance ou d'un graphe de Markov pour ne citer qu'eux, fournit une représentation du système se restreignant à des scénarios de défaillance conduisant à un état redouté.

Il est donc nécessaire d'avoir recours à des descriptions différentes pour chaque activité :

- **de nature déterministe** pour une représentation comportementale fonctionnelle du système celui-ci peut ensuite être éventuellement décliné en plusieurs modèles plus ou moins abstraits, par exemple, la mesure de performances temporelles par des simulations (validation dynamique du système), ou la vérification/validation par des méthodes formelles, exploiteront la modélisation différemment.

- **de nature probabiliste** pour une représentation des phénomènes stochastiques liés aux défaillances et pour mesurer les différents indicateurs de sûreté de fonctionnement.

Cependant, pour l'applicabilité industrielle d'une méthodologie, il est important que chaque analyse n'implique pas une ré-formalisation du système complet dans le langage associé, pour des raisons évidentes de coût, de temps, et d'erreurs de traduction d'un modèle à l'autre.

Le fil conducteur de la méthodologie de conception consiste à opter pour un formalisme de modélisation comportementale, compatible d'une part, avec les spécificités des systèmes de contrôle-commande et, d'autre part, avec l'ensemble des analyses précitées.

A partir d'une modélisation initiale de haut niveau, autorisant une description raffinée des différentes tâches à réaliser par le système, plusieurs modélisations plus abstraites sont déduites pour les analyses effectuées en parallèle de la modélisation. En fonction des outils existant sur le marché, ces déclinaisons peuvent être réalisées automatiquement ou, le cas échéant, manuellement par élimination ou agrégation des détails superflus.

La figure suivante résume ce concept :

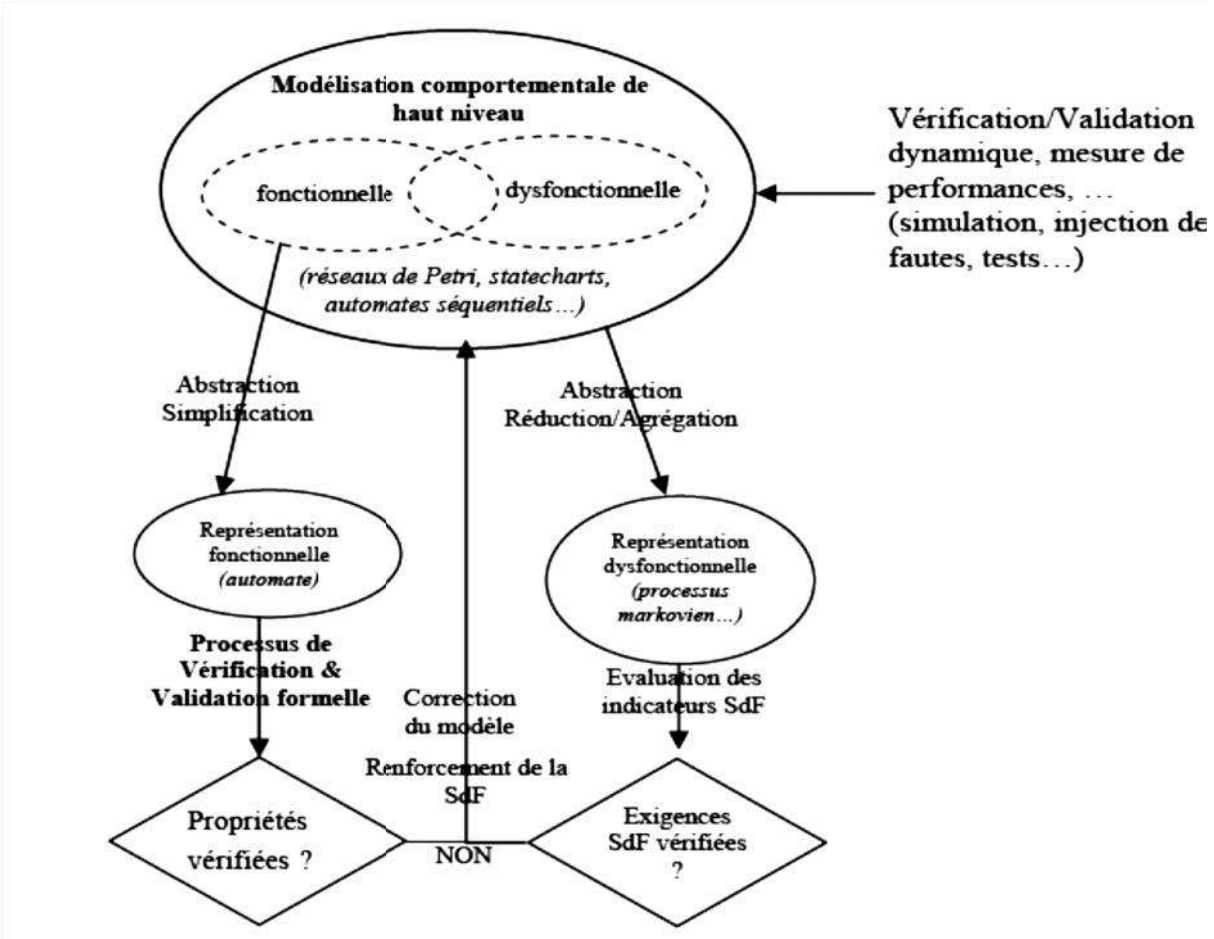


Figure 15: Traitement des différentes modélisations

Il apparaît que les formalismes basés sur les automates à états finis correspondent le mieux aux besoins du secteur automobile, d'une part, leur nature discrète est en adéquation avec le caractère discret des systèmes de contrôle-commande, d'autre part, cette représentation, couplée à un moteur de preuve et une spécification de propriété, permet d'exploiter les méthodes formelles.

Enfin, la représentation du comportement sous forme d'automates facilite la construction du graphe de Markov sous-jacent.après avoir rappelé les principales caractéristiques des systèmes de contrôle-commande, nous allons faire un état des lieux sur les formalismes de modélisation « fonctionnelle » jugés intéressants comme base d'une méthodologie de conception.

Les formalismes retenus reposent sur une description sous forme d'automates à états finis.

3.2. Les systèmes de contrôle-commande :

Les applications actuelles des systèmes de contrôle-commande deviennent de plus en plus complexes, en raison du nombre de fonctions à assurer et à spécifier et des multiples interactions entre les différents systèmes embarqués.

Les principales missions de ces systèmes, conçus dans la technologie informatique sont :

- assurer la commande du processus physique.

- assurer la performance de la commande vis-à-vis des exigences formulées.

- assurer l'aide au diagnostic des défaillances du système.

- assurer les stratégies de tolérance aux fautes implémentées dans l'algorithme de contrôle-commande.

A titre informatif, précisons que ce dernier point représente une source d'erreur assez importante dans le processus de conception de l'algorithme en raison de la complexité induite par la multiplication des modes de fonctionnement.

Les caractéristiques de ces systèmes sont bien connues:

- ils mélangent des phénomènes continus et des événements discrets (systèmes hybrides).

- ils possèdent plusieurs modes de fonctionnement.

- ils ont un nombre de variables limité.

- ils nécessitent des fréquences d'échantillonnage élevées.

- ils nécessitent un retard faible entre la détection d'un événement et l'action associée.

- ils doivent assurer une grande variété de missions : régulation gestion d'événements, sûreté de fonctionnement, diagnostic, …

Ces systèmes sont qualifiés de réactifs, c'est-à-dire qu'ils réagissent de façon permanente aux sollicitations de leur environnement. Le système réactif contrôle le

comportement de l'environnement en observant son évolution dans le temps par des capteurs et en pilotant au moyen d'actionneurs (figure 16).

En général, ces systèmes sont soumis à des contraintes temporelles fortes et doivent répondre dans des délais très stricts à des stimuli de l'environnement.

La dynamique est imposée par le processus commandé.

Ces systèmes sont alors qualifiés de temps réel.

Fournit une définition d'un système temps réel : « c'est un système qui doit satisfaire des contraintes de temps de réponse explicites et bornées. Si les bornes temporelles ne sont pas respectés, des dégradations des performances et des mauvais fonctionnements apparaissent ».

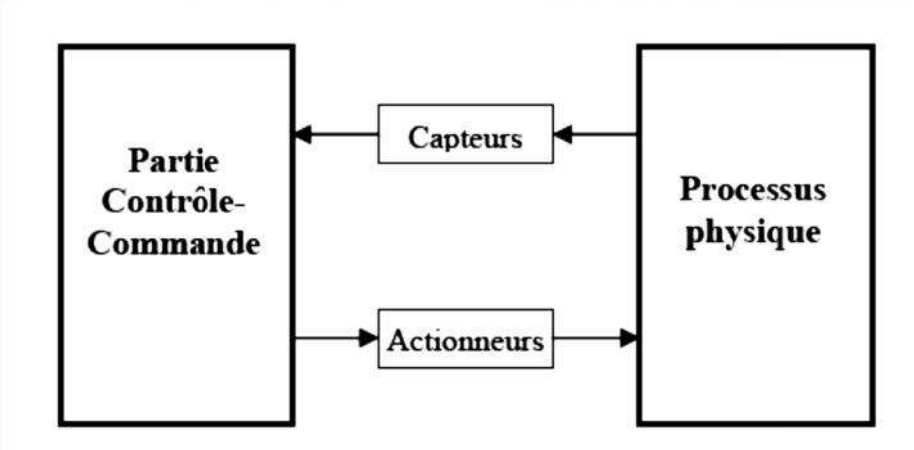


Figure 16: Interactions Système de Contrôle-Commande/Processus physique

De plus, les systèmes de contrôle-commande peuvent être composés de différentes parties actives opérant au même moment.

Ce sont des systèmes à composantes parallèles. Cette caractéristique engendre des complications qui n'existent pas dans les systèmes où une seule tâche s'exécute.

Par exemple, il est nécessaire de résoudre le problème de l'accès concurrent à des ressources communes.

Enfin, comme nous l'avons déjà évoqué, la conception des systèmes de contrôle-commande nécessite de prendre en compte les interactions entre les phénomènes discrets et continus.

On décompose habituellement le système hybride en plusieurs sous-systèmes discrets et continus comme illustré sur la (figure17).

La partie opérative contient l'ensemble des variables continues représentant le processus physique à commander (régulation en vitesse, pression, débit, …).

La partie commande représente l'automatisme à concevoir et élabore l'ensemble des actions/opérations en fonction de l'état de la partie opérative (élaboration des consignes actionneurs, gestion des modes de fonctionnement, des reconfigurations,..).

Lorsque cette partie commande est complexe, celle-ci peut se décomposer en une partie commande (PC) et opérative (PO), cette dernière contenant l'ensemble des variables et des opérateurs servant à effectuer les calculs.

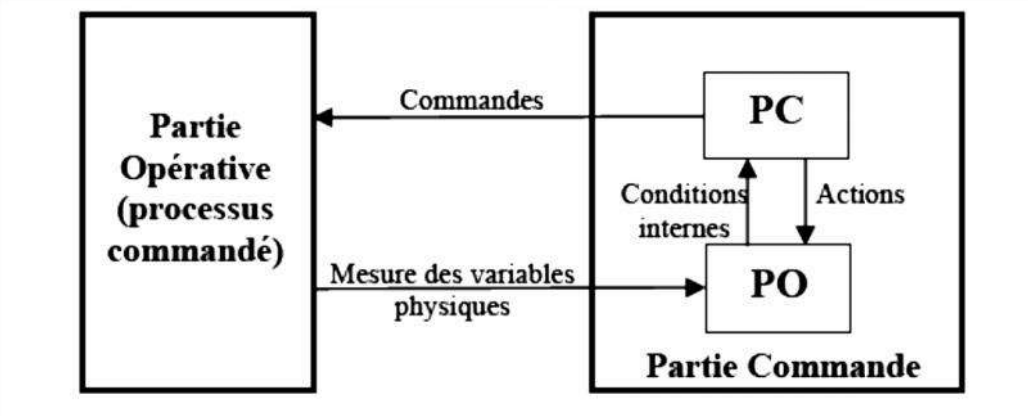


Figure 17. Décomposition du système en PC et PO

Au regard de la spécificité et de la complexité des systèmes de contrôle-commande, un formalisme de modélisation doit être judicieusement choisi pour représenter le comportement du système par rapport à la dynamique de l'environnement.

Celui-ci doit être suffisamment expressif pour permettre une analyse de performance tant au niveau fonctionnel dysfonctionnel (possibilité de représentation de défaillance).

Un critère d'importance porte également sur la possibilité de mettre en œuvre des analyses formelles à des fins de vérification/validation, quitte à adapter le modèle en conséquence par un conditionnement de celui-ci et de supporter les techniques de simulation hybride, approche complémentaire des techniques formelles. Nous allons à présent passer en revue quelques formalismes de modélisation répondant à nos besoins

3.3. Formalismes de modélisation :

3.3.1. Préambule :

La méthodologie proposée nécessite de disposer le plus en amont possible d'un modèle complet du système à développer afin d'être capable de maîtriser au plus tôt l'ensemble des erreurs potentielles de conception et de mettre en œuvre les évaluations et les stratégies de renforcement de la sûreté de fonctionnement.

Il est nécessaire de modéliser :

- le système lui-même (PO+PC) dans les modes nominaux, dégradés et au cours des transitions de reconfiguration,

- son environnement (générant les entrées du système, utilisant les sorties et produisant les événements externes agissant sur le système).

- les défaillances d'éléments devant être prises en compte dans les analyses de sûreté de fonctionnement.

De nombreux formalismes sont disponibles actuellement, que nous pouvons classer selon trois critères :

- Approche de type « états-transitions » (Statecharts, Esterel, Réseaux de Pétri, …) ou de type « logique » (logique temporelle, …).

- Approche synchrone ou asynchrone.

- Approche textuelle ou graphique.

Concernant le premier point, précisons que les systèmes de transitions se focalisent sur la description de la dynamique du système à commander tandis que les approches logiques insistent plus une description statique et abstraite du système.

Le deuxième point caractérise les formalismes selon leur façon de prendre en compte le temps et les événements.

Nous privilégions le formalisme de type état-transition, car il apparaît comme étant le mieux adapté à la modélisation de systèmes de contrôle-commande et à la mise en œuvre des différentes analyses précédemment évoquées.

3.3.2. Modélisation hybride :

Les systèmes considérés nécessitent de prendre en compte à la fois l'aspect discret et continu.

Or, quand les deux aspects sont étroitement liés et que les degrés d'intégration et de complexité sont élevés, la modélisation du système par une seule de ces composantes n'est pas possible ; il est difficilement envisageable de se limiter à une représentation intégralement discrète ou entièrement continue.

De nombreux travaux ont fait l'objet du problème de la coopération des deux composantes au sein d'un même modèle. La modélisation de l'aspect hybride est alors abordée selon deux tendances: d'une part, la tendance reposant sur l'intégration des aspects continu et discret au sein d'un même formalisme, et d'autre part, celle associant un formalisme différent pour chaque aspect.

3.3.2.1. L'approche intégrée :

Dans la démarche d'intégration des deux aspects au sein d'un même modèle, deux approches intégrées sont possibles.

Elles dépendent du modèle dominant, c'est-à-dire du modèle à partir duquel est effectuée l'extension : on distingue l'approche continue et l'approche discrète.

- **l'approche continue** : celle-ci consiste à intégrer l'aspect discret au sein de la représentation continue. Le comportement du modèle continu est étudié en présence de discontinuités : non-linéarité (seuil, saturation, relais, …), commutation, etc.…

- **l'approche discrète** : l'aspect continu est intégré au sein d'un modèle à événements discrets comme les réseaux de Pétri. Propose un exemple basé sur les réseaux de Pétri.

Les variables continues du processus physique à commander sont discrétisées et représentées par un certain nombre de jetons dans des places, l'évolution des variables se traduit par l'apparition ou la disparition de jetons dans ces places.

Le couplage entre l'aspect discret et l'aspect continu est réalisé à l'aide de transition commune entre places « continues » et places « discrètes ».

3.3.2.2. L'approche séparée :

Celle-ci consiste à séparer l'aspect discret et l'aspect continu.

On distingue également deux types d'approche :

- **Le « moniteur » de systèmes d'équations** : dans un certain sens, le modèle à événements discrets peut être considéré comme un moniteur des équations formant le modèle continu. à un instant donné, seul l'un des modèles est actif, soit il y a modification de la structure des équations formant le modèle continu et le temps n'évolue pas, soit le temps évolue mais la structure des équations ne change pas, certains automates hybrides se basent sur cette approche : ils associent un automate classique et un ensemble de variables continues dont les conditions portant sur leurs valeurs sont exprimées sur les transitions de l'automate. L'évolution dynamique des variables continues est modélisée par des ensembles d'équations différentielles associés aux états discrets de l'automate.

- **L'approche superviseur** : dans cette approche, deux blocs différents correspondant aux aspects discrets et continus sont couplés par une interface, chaque modèle décrit un sous-système, qui peut éventuellement évoluer de façon autonome. Il ne s'agit pas de deux vues complémentaires d'un même système, mais plutôt de deux sous-systèmes représentés par deux modèles, l'interface traduit les signaux échangés entre les deux parties, les variables de la partie continue évoluent de façon autonome dans le temps, le système superviseur, représentant un système à événement discret, regarde l'évolution de ces variables continues en s'intéressant uniquement aux changements d'états discrets, quand un état spécifique est observé, une action correspondante du système superviseur est lancée. [11]

3.4. Définitions et terminologies des chaînes de Markov:

ce type de modélisation est relativement peu connu en génie mécatronique, et reste marginal malgré les efforts continus de nombre de chercheurs. La raison de cette méconnaissance relève du fait que la plupart des travaux sur la théorie des chaînes de Markov sont écrits pour des systèmes mathématiques et par des mathématiciens, avant d'être un outil applicable au génie mécatronique, la théorie des chaînes de Markov a été en effet développée en tant qu'objet mathématique ayant pour cadre principal les probabilités et les statistiques.

Plusieurs systèmes ont la propriété suivante : si on connaît l'état présent d'un système, les états passés n'affectent pas la transition de l'état présent à l'état suivant (le futur état). Cette propriété particulière, qui décrit l'absence de mémoire d'un système, est appelée la propriété de Markov et les systèmes qui obéissent à cette propriété sont des chaînes de Markov ou des processus de Markov.

Le point clé de la théorie markovienne réside dans le fait que si nous connaissons l'état initial et l'état présent d'un système, il est possible de prédire l'état du système à n'importe quel instant. [12]

On considère un système pouvant prendre N états que nous noterons E1,E2……..EN. La modélisation du système consiste alors à décrire les transitions entre ces N états.ces transitions sont, en général d'origine aléatoire.

Nous noterons Pij (Δt) la probabilité de passage de l'état Ei à l'état Ej entre les instants t et t+Δt, sachant que l'on était à l'état Ei à l'instant t.



Figure18. la probabilité de passage

Un processus est dit markovien lorsque la probabilité pour que le système soit à l'état Ej au temps t + Δt ne dépende que de l'état ou il se trouvait au temps (t) parle alors de processus (« sans mémoire »).Le processus est homogène lorsque les probabilités de transition sont indépendantes du temps.il est discret si le temps varie de façon continue. Les phénomènes pris

en compte dans les études de fiabilité et de maintenabilité nous amènent à considérer plus particulièrement les processus markoviens homogènes à espace d'états fini.

En effet :

- le nombre des états de marche ou de panne que peut prendre un système est fini.
-les transitions entre états représentent, soit une panne, soit une réparation.
Les hypothèses les plus communément utilisées en fiabilité conduisent à considérer que les durées entre panne et les durées de réparation peuvent être décrites par des lois exponentielles (phénomènes sans mémoire).

Les densités de probabilité conditionnelles p_{ij} définies en (18) peuvent alors être assimilées aux taux de défaillance λ = 1/MTBF(1) et aux taux de réparation μ = 1 /MTTR (2).Nous pouvons illustrer cette démarche à l'aide d'un exemple simple .considérons un système formé de deux équipement identiques en redondance active, deux réparateurs étant disponible. On peut modéliser le système de la manière suivante :

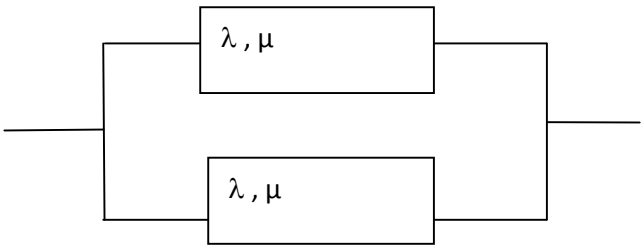


Figure19. Diagramme de la fiabilité

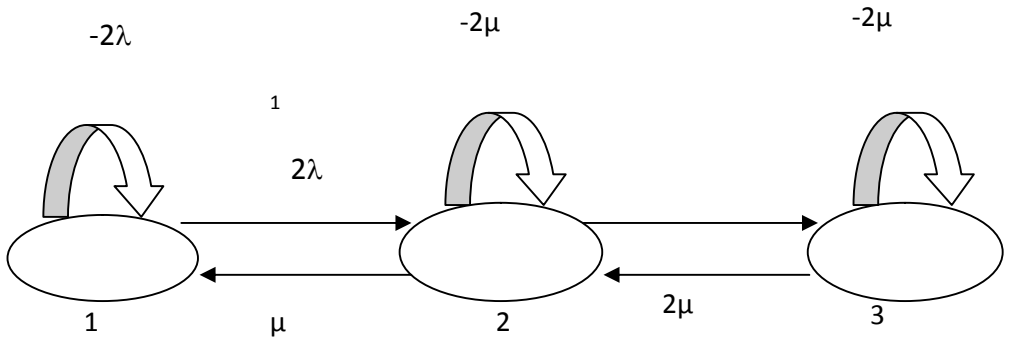


Figure20. Graphe de transition

[1] Moyenne des temps de bon fonctionnement
[2] Moyenne des temps de réparation

Ainsi la probabilité de se trouver à l'état (2) (un équipement en panne) à l'instant

(t + Δt) est la somme des trois probabilité composées suivent :

-probabilité d'être dans l'état (1) (aucun équipement en panne (1 - λΔt) ni (soit P1 (t)) puis panne entre t et t+Δt (soit 2λ*Δt).

Probabilité d'être dans l'état (2) à l'instant t sans panne (1-λΔt) ni réparation (1μΔt) Probabilité d'être dans l'état (3) (deux équipement en panne) à l'instant t, puis réparation entre t et t+ Δt (soit 2μ*Δt).

En conservant les termes du 1ere ordre, on montre alors que le système peut être décrire par l'équation matricielle suivante (système différentiel linéaire à coefficients constants) :

$$\begin{bmatrix} p_{.D}^{1} \\ p_{.D}^{2} \\ p_{.D}^{3} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -2\lambda & \mu & 0 \\ 2\lambda & -\lambda-\mu & 2\mu \\ 0 & \lambda & -2\mu \end{pmatrix} * \begin{bmatrix} p_D^1 \\ p_D^2 \\ p_D^3 \end{bmatrix} = \quad A_D \quad \begin{bmatrix} p_D^1 \\ p_D^2 \\ p_D^3 \end{bmatrix} \quad \text{.....1.1}$$

Si nous considéron (1) et (2) comme des états de marche, la disponibilité du système D(t), probabilité que le système fonctionne à l'instant t , s'exprime par :

D(t) = $p_D^1(t) + p_D^2(t)$

La fiabilité R(t),probabilité que le système fonctionne pendant l'intervalle (0,t) sachant qu'il fonctionnait à l'instant 0, se calcule en rendant absorbant l'état de panne (3).

On obtient ainsi un système d'équation analogue à 1.1 mais ou A_D est remplacé

par A_D

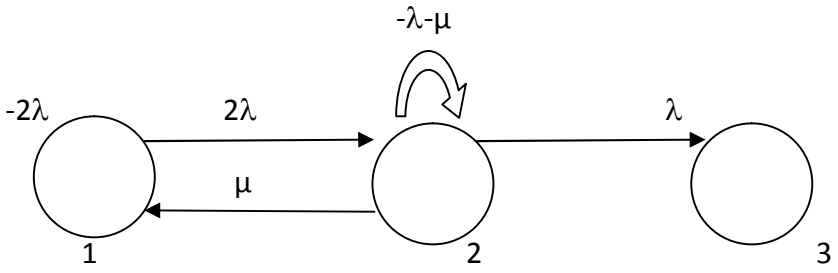


Figure 21 probabilités de fonctionnement

$$A_D = \begin{pmatrix} 2\lambda & \mu & 0 \\ 2\lambda & -\lambda-\mu & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \end{pmatrix} \quad \text{.....1.2}$$

R(t) = $p_R^1(t) + p_R^2(t)$

La maintenabilité M(t), probabilité que le système soit réparé dans l'intervalle (0, t) sachant qu'il était en panne à l'instant 0, se calcule en rendant absorbants les états de marche (1) et (2) (d'où une équation analogue à 1.2 ou A_D est remplacé par A_M).

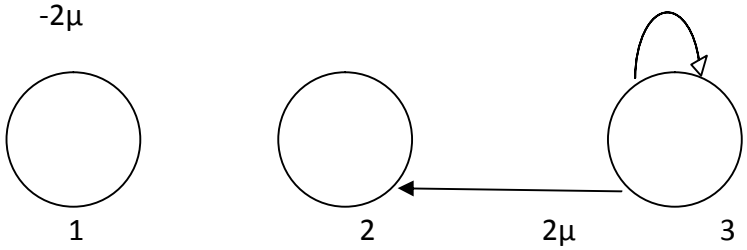


Figure 22.probabilité de réparation

$$A_M = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\mu \\ 0 & 0 & -2\mu \end{pmatrix} \quad \text{.....1.3}$$

M(t)=$p_M^1(t) + P_M^2(t) = 1 - P_M^3(t)$. [13]

3.5. Notions élémentaires sur les réseaux de pétri :

3.5.1. Définition (Réseau de Pétri) :

Un réseau de Pétri (RdP) est un graphe constitué de 2 sortes de nœuds : les places (représentées par des ronds) et les transitions (représentées par des barres).

Le graphe est orienté : des arcs vont d'une sorte de nœuds à l'autre (jamais de places à places, ou de transitions à transitions directement).

Voir exemple dans la figure suivante.

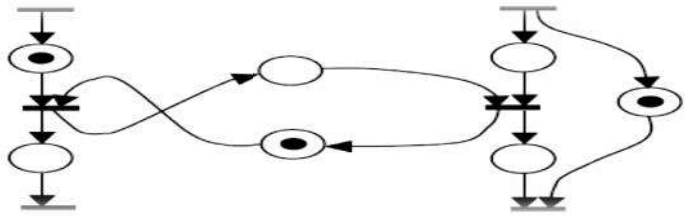


figure23 .exemple de RdP

De façon plus formelle, un RdP peut-être défini par un 4-uplet <P, T, Pré, Post> tel que :

P ={P1, P2 , , Pn} est un ensemble fini et non vide de places .

T ={T1, T2 , , Tm} est un ensemble fini et non vide de transitions .

Pré : P× T ⟶ {0, 1} est l'application d'incidence avant .

Post : P × T ⟶ {0, 1} est l'application d'incidence arrière.

Pré(P i ,T j)est le poids de l'arc (orienté) reliant la place Pi à la transition Tj. ce poids vaut1 si l'arc existe et 0 sinon.

post (Pi, Tj) est le poids de l'arc (orienté) reliant la transition Tj à la place Pi .

Marquage des places:

Les places sont marquées par des jetons (points noirs) qui vont circuler dans les places selon certaines règles (définies ci-dessous). Cette circulation symbolise l'évolution dynamique du système. Le marquage initial (celui indiqué sur le dessin) donne la position initiale des jetons.

3.5.2. Règles de fonctionnement et circulation des jetons :

Pour qu'une transition puisse être activée, la présence d'un jeton au moins est requise dans chaque place située en amont de la transition. L'activation (le tir) de la transition a pour

effet de prélever ces jetons des places amont et de rajouter dans chaque place aval un nouveau jeton, de façon plus formelle, le franchissement (tir) d'une transition Tj ne peut s'effectuer que si le marquage de chacune des places Pi directement en amont de cette transition est tel que :

(m Pi) Pré (Pi, Tj) (condition nécessaire).

Le franchissement (tir) de Tj consiste à retirer Pré (Pi, Tj) jetons dans chacune des places directement en amont de Tj et à ajouter Post (Pk, Tj) jetons dans chacune des places Pk directement en aval de Tj .

3.5.3. Modélisation de la concurrence (ou logique) et de la synchronisation (et logique) :

- concurrence à la fourniture de jetons dans une place : c'est la convergence d'arcs sur une place

- concurrence à la consommation des jetons d'une place : c'est la divergence d'arcs à partir d'une place (voir figure b suivante). Ce conflit structurel doit être arbitré par une règle de priorité quelconque lorsque le conflit est effectif (c'est-à-dire lorsque les transitions aval en compétition pourraient effectivement être activées). Ne pas arbitrer un conflit effectif fait que le comportement du système n'est pas entièrement spécifié.

- synchronisation dans la consommation de jetons de plusieurs places : c'est la convergence de plusieurs arcs sur une transition (voir figure c suivante).

- synchronisation dans la fourniture de jetons à plusieurs places : c'est la divergence d'arcs à partir d'une transition (voir figure suivante).

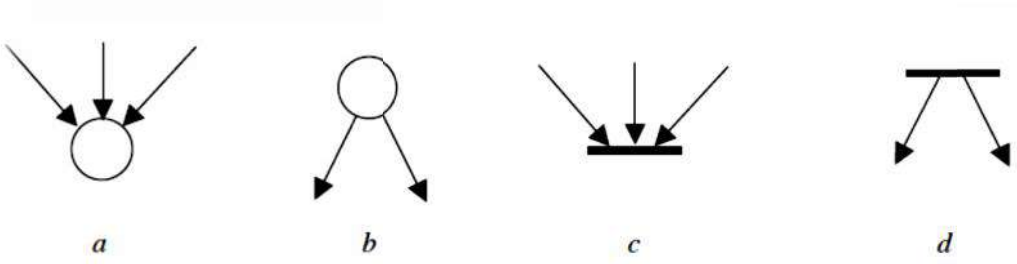


Figure 24. Modélisation de la concurrence et de la synchronisation

3.5.4. Temporisation des places et/ou des transitions :

A priori, on peut penser à l'activation d'une transition comme au déroulement d'une tâche : il faudrait alors mettre une temporisation sur les transitions. par ailleurs, si on pense à une place comme un endroit où une ressource séjourne en attendant de poursuivre son parcours, il peut y avoir une durée minimale de séjour à respecter : penser par exemple au séjour d'une pièce dans un four pour atteindre une température souhaitée.

On est donc tenté de mettre à la fois :

- Une durée d'activation pour les transitions : durée pendant laquelle un jeton situé dans chaque place amont de la transition activée est « réservé » pour cette transition (avant de disparaître), et au-delà de laquelle un jeton apparaît dans chacune des places aval.

- Une durée minimale de séjour dans les places : durée pendant la quelle tout jeton qui vient d'être produit dans une place ne peut pas encore servir à l'activation de transitions aval.

En fait, il n'y a aucune perte de généralité à ne mettre de temporisations que sur les transitions, ou que sur les places. la figure suivante montre la transformation d'une transition de durée t en 2 transitions instantanées (le début et la fin) séparées par une place de temporisation t.

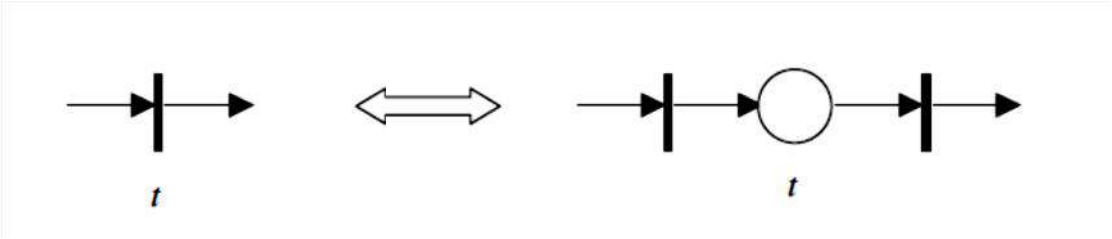


Figure 25. la transformation d'une transition

On notera aussi l'existence de RdP temporels, pour lesquels on associe aux places et/ou aux transitions une temporisation dont la valeur peut se situer à l'intérieur d'un intervalle [a, b].

3.5.5. Graphes d'événement :

3.5.5.1. Restrictions et capacités de modélisation :

Les graphes d'événements sont une sous-classe de RdP pour lesquels toute place a exactement une transition amont et une transition aval (les situations représentées dans les figures a et b précédentes sont interdites).aussi, les graphes d'événements peuvent modéliser des phénomènes désynchronisation, mais pas de concurrence.

A l'opposé, les graphes d'état refusent les configurations représentées dans les figures c et précédentes pour ne retenir que celles représentées dans les figures a et b. Aussi, les graphes d'état, tels que toute transition a exactement une place d'entrée et une place de sortie, permettent de visualiser des phénomènes de concurrence (décision), mais pas désynchronisation.

3.5.5.2. Une propriété fondamentale des graphes d'événements :

Le nombre total de jetons le long de tout circuit d'un graphe d'événements reste constant.

Ceci n'est généralement pas vérifié dans le cas d'un RdP (le nombre de jetons total d'un RdP ne reste pas nécessairement constant au cours de l'évolution du marquage du réseau).

3.5.5.3. Exemples :

Soit une machine représentée dans la figure suivante. Chaque pièce qui arrive est, soit traitée immédiatement par la ressource machine, soit mise en attente dans le stock (à capacité infinie) jusqu'à ce que la ressource machine soit disponible. Le temps de traitement de la ressource machine est de 3 unités de temps. Après traitement, chaque pièce sort.

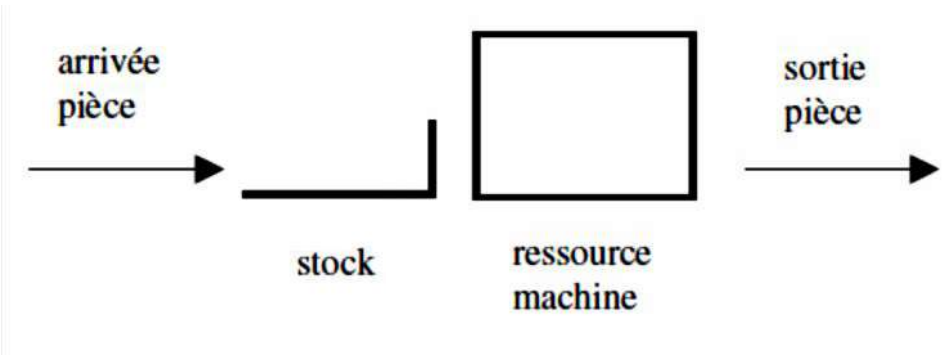


Figure 26 représentations d'une machine

Le RdP suivant modélise ce système.

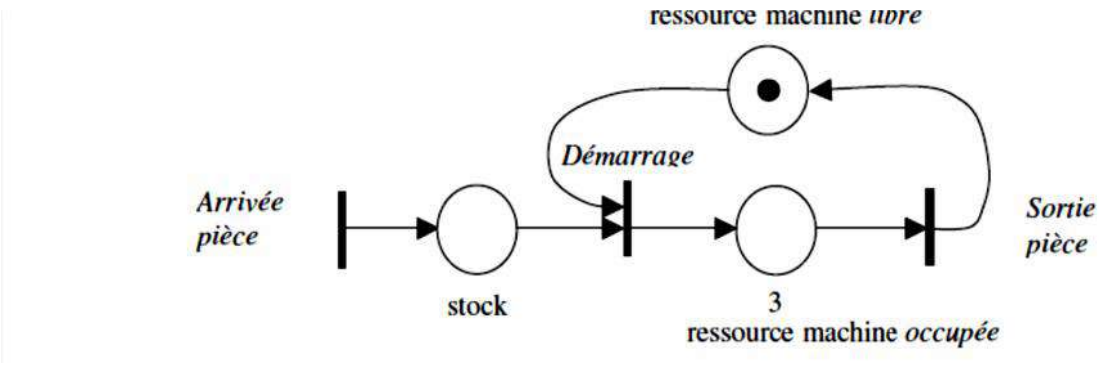


figure27. Modélisation de la machine

L'état du système modélisé par le RdP est représenté par le marquage définissant le nombre de jetons contenus dans chaque place. L'évolution de l'état (représentant la dynamique du système) correspond à l'évolution du marquage (produit par le franchissement de transitions).

3.5.5.4. Modifications :

a) Le modèle RdP suivant indique une capacité de stockage limitée à 5 pièces.

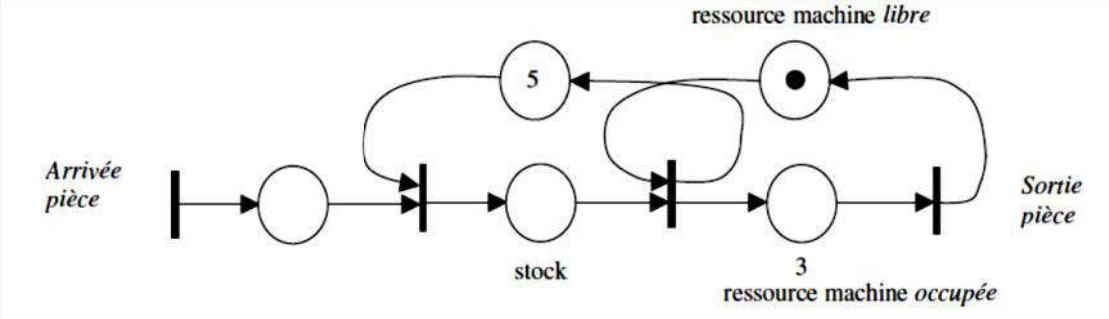


Figure28. RdP indique une capacité de stockage

b) Le stock en amont de la ressource machine est remplacé par un convoyeur correspondant à une file composée de 5 compartiments (gestion first-in, first-out du convoyeur).

c) Le temps de déplacement du convoyeur est de 6 unités de temps. le système est représenté par le modèle RdP suivant.

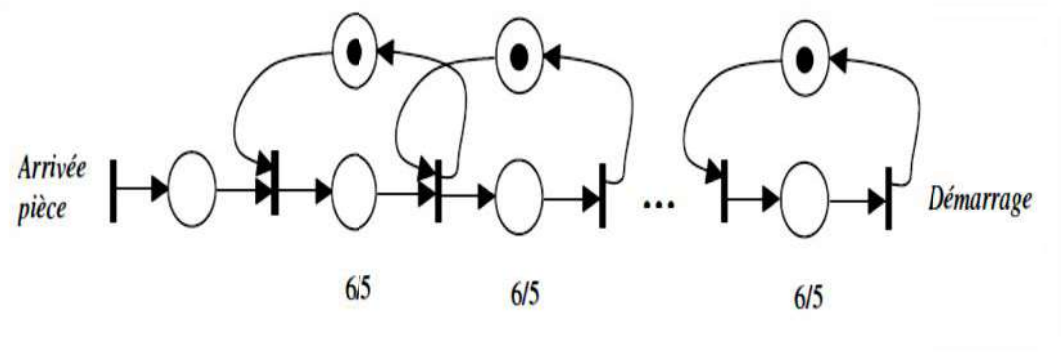


Figure29. Le temps de déplacement du convoyeur

c) La machine a une capacité de traitement de 2 : elle est capable de traiter 2 pièces simultanément. Le système est représenté par le modèle RdP suivant.

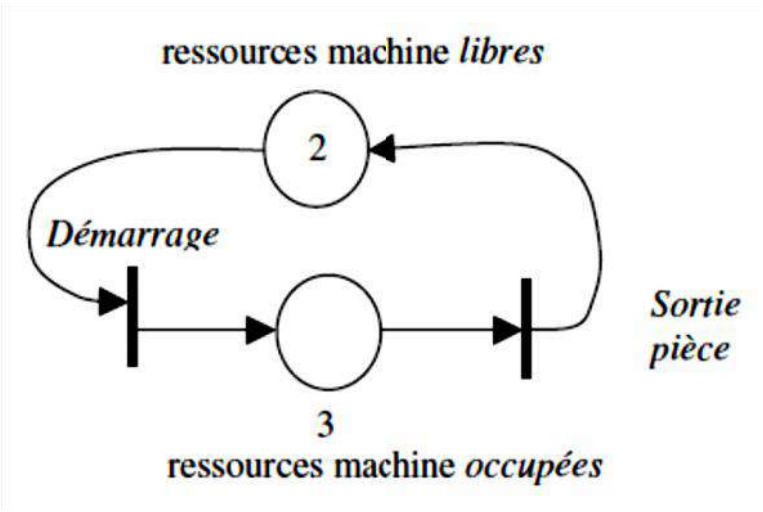


Figure 30.machine a une capacité de traitement (système est représenté par le modèle RdP)

d) La machine a un temps de setup de 1,5 unités de temps. Le système est représenté par le modèle RdP suivant

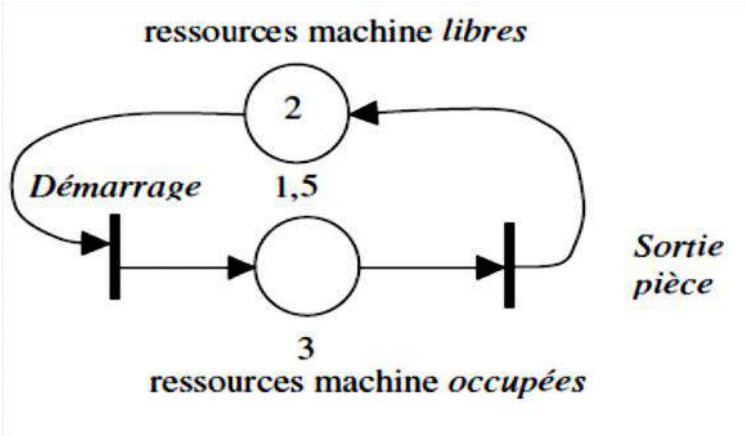


Figure31 machine a un temps de setup

3.6. Autres classes de réseaux de pétri :

3.6.1. Réseau de Pétri synchronisé :

Un ensemble d'événements externes est associé au RdP, ces événements permettent le franchissement de certaines transitions. Un tel RdP est dit synchronisé. Considérons le RdP modélisant la machine décrite dans 5.3.on associe à ce RdP l'ensemble d'événements

{A, D, S} où A désigné l'événement « Arrivée pièce », D l'événement« démarrage service », S l'événement « Sortie pièce ».

La figure suivante représente le système modélisé par un RdP synchronisé.

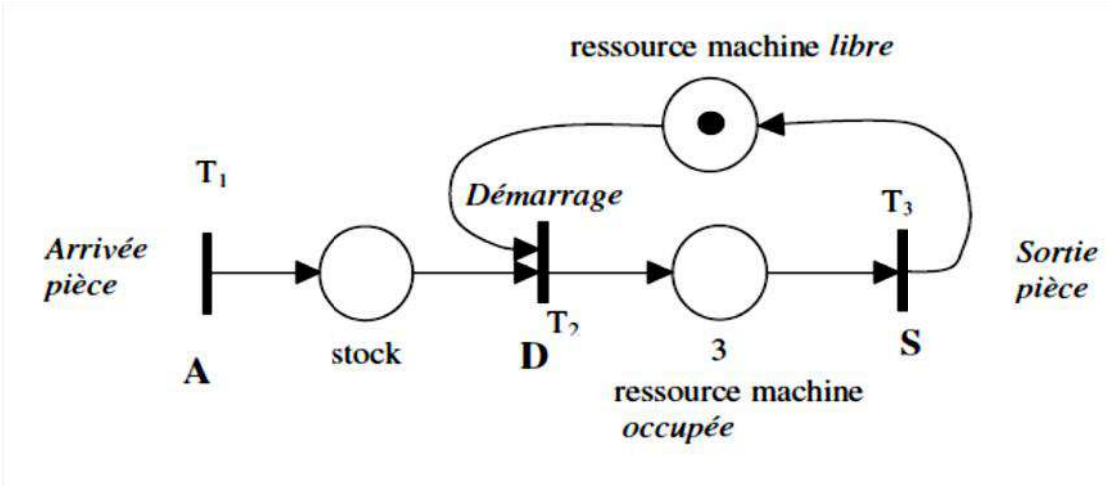


Figure32 le système modélisé par un RdP synchronisé

Le tir de la transition T1 est lié à l'occurrence de l'événement A.

Le tir de la transition T2 est lié :

- A la validation de la transition, matérialisée par la présence d'au moins un jeton dans la place « stock » et d'un jeton dans la place « ressource machine libre » ;

- Au démarrage effectif du service (occurrence de l'événement D). Le tir de la transition T3 est lié à l'occurrence de l'événement S.

3.6.2. Réseau de Pétri généralisé :

Un RdP généralisé est un RdP dans lequel les poids associés aux arcs sont des nombres entiers strictement positifs. Ces poids peuvent être différents de 0 ou 1.Tous les arcs, dont le poids n'est pas explicitement spécifié, ont un poids de 1.

Soit un arc reliant une place Pi à une transition Tj ayant un poids égal à p, alors la transition Tj ne sera validée que si la place Pi contient au moins p jetons. Lors du franchissement de cette transition, p jetons seront retirés de la place Pi. Le fait qu'un arc relie une transition Tj à une place Pi avec un poids égal à p, signifie que lors du franchissement de cette transition, p jetons seront ajoutés à la place Pi.

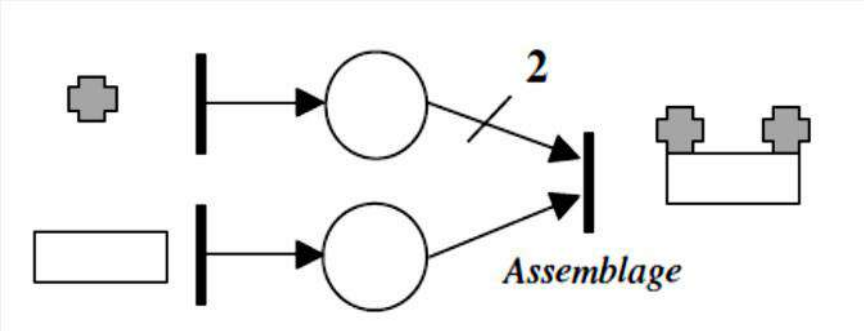


Figure 33 .Réseau de Pétri généralisé

3.6.3. Réseau de Pétri à arcs inhibiteurs :

Un arc inhibiteur est un arc orienté qui part d'une place pour aboutir à une transition (et non l'inverse). Son extrémité est marquée par un petit cercle. La présence d'un arc inhibiteur entre une place Pi et une transition Tj signifie que la transition Tj n'est validée que si la place Pi ne contient aucun jeton.

Le franchissement de la transition Tj consiste à retirer un jeton dans chaque place située en amont de la transition à l'exception de la place Pi, et à ajouter un jeton dans chaque place située en aval de la transition. [14]

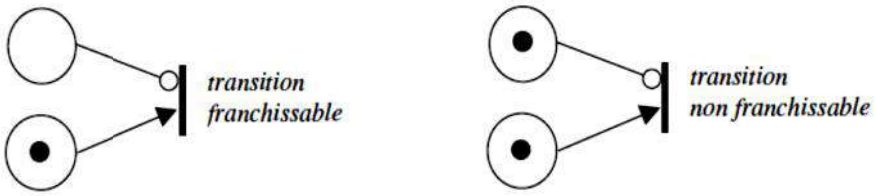


Figure34 franchissement de la transition

3.7. Conclusion :

Les systèmes mécatroniques sont de plus en plus utilisés dans l'industrie. Tous les secteurs sont concernés : l'automobile, l'aéronautique, le nucléaire, le spatial et même des domaines comme le bancaire ou le médical. Le développement d'un système mécatronique est envisagé selon l'approche de l'ingénierie concourante dans le cadre d'un cycle de développement.

La complexité importante de systèmes mécatroniques et la réduction des coûts de conception et d'exploitation incitent les industriels à maîtriser davantage la sûreté de fonctionnement.

Afin d'optimiser le développement des systèmes complexes, des méthodes sont utilisées dans chaque étape du cycle de développement pour analyser la fiabilité. L'ensemble de ces méthodes constitue un processus à part entière : le processus de fiabilité.

Les principales méthodes d'analyse de la fiabilité ont été comparées entre elles. Une classification de ces méthodes par rapport à chaque phase du cycle en V a montré que les méthodes utilisées dans les étapes descendantes du cycle de développement sont plutôt qualitatives, alors que dans les étapes montantes elles sont, en plus, quantitatives.

Les RdP sont la méthode qui peut être utilisée dans toutes les phases d'un cycle de développement d'un système complexe, elle est la plus adaptée pour évaluer la fiabilité d'un système mécatronique, car elle répond, d'une part, aux principales contraintes liées à la

fiabilité d'un système mécatronique et, d'autre part, elle est utilisable dans chaque étape du cycle de développement. En outre, la méthode RdP est la seule qui permet d'analyser le comportement fonctionnel/dysfonctionnel et l'aspect dynamique du système.

Chapitre 04 :

Application sur un système de freinage Antiblocage ABS.

4.1. Introduction :

Pour illustrer les notions de système mécatronique et de sûreté de fonctionnement, examinons un exemple issu du secteur automobile. Aujourd'hui mieux rouler c'est aussi, paradoxalement, mieux freiner. Dans ce but, les constructeurs proposent des systèmes d'antiblocage des freins qui permettent d'éviter le blocage d'une ou plusieurs roues pendant le freinage et de maintenir la stabilité du véhicule. Cet exemple traduit bien l'évolution technologique de ces dernières années c'est à dire la construction de systèmes qui doivent réaliser à la fois plusieurs fonctionnalités et intégrer plusieurs technologies. Ainsi, des composants mécaniques sont pilotés par des composants électroniques et/ou par des logiciels embarqués. [15]

L'objet nécessaire du système de freinage antiblocage (Anti-lock Brake System – ABS) est de diminuer le glissement des roues lors du freinage, améliorant ainsi la capacité de freinage et le contrôle de la direction du véhicule.

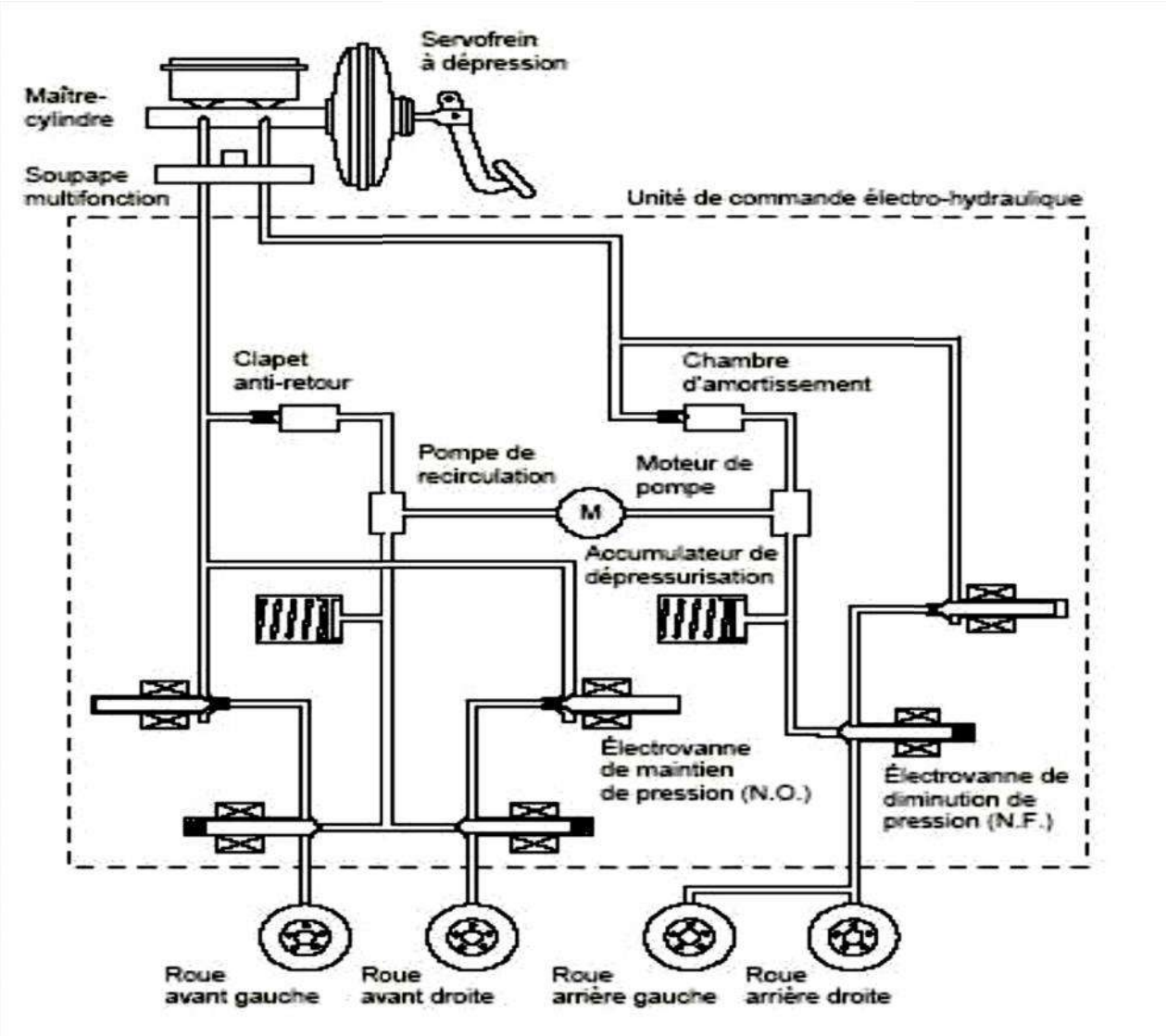


Figure 35 descriptions du système hydraulique des freins antiblocage

C'est à la fin des années 70 que le système de freinage ABS a atteint un niveau de développement permettant la production en série. Ce système a permis d'améliorer la sécurité dans des situations de freinage critiques. Sur les véhicules sans l'ABS, les roues avaient tendance à se bloquer en cas de freinage d'urgence à cause d'un obstacle ou dans certaines conditions (pluie, verglas). Il n'était alors plus possible pour le conducteur de diriger son véhicule.

Le système ABS empêche le blocage des roues et le véhicule peut donc toujours être dirigé même en cas de freinage brusque.

4.2. Les composants du système ABS :

Le système ABS est composé des éléments suivants :

■ Calculateur

■ Modulateur hydraulique

■ Capteurs de vitesse

■ Freins de roue

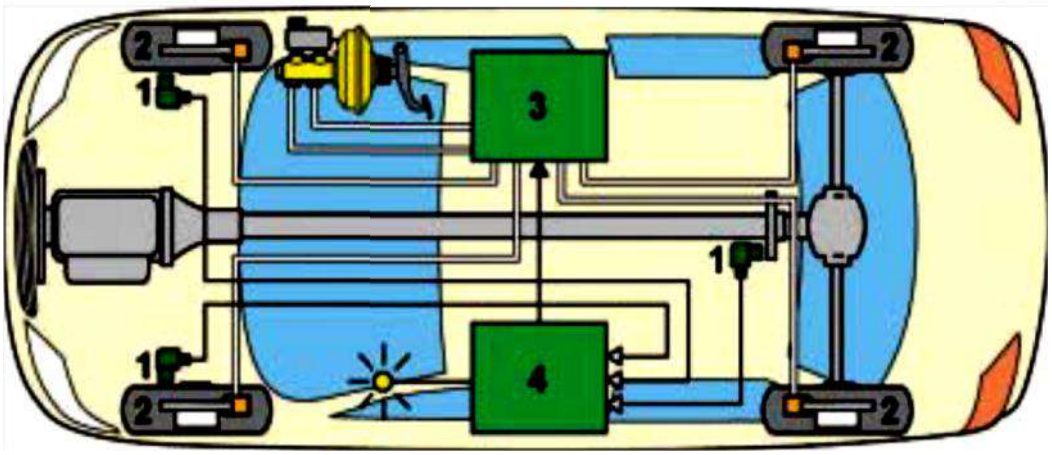


Figure 36. Dessin synthétiseur montre les composants du système ABS

1. Capteurs de vitesse de roue.2. Freins de roue.3. Modulateur hydraulique.4. Calculateur.

Le calculateur constitue le cœur du système, il reçoit et analyse les signaux transmis par les capteurs de vitesse de roue. Les indications sur le patinage, la décélération ou l'accélération de la roue lors du freinage sont issues de ces signaux. Ces informations sont

Traitées par un calculateur numérique constitué de deux microcontrôleurs indépendants mais fonctionnant en parallèle dont chacun contrôle deux roues.

Les signaux de régulation ainsi générés sont envoyés aux électrovannes du modulateur hydraulique.

Dans le **modulateur hydraulique**, les électrovannes exécutent les instructions de régulation du calculateur. Même si le conducteur appuie trop fort sur la pédale de frein lors d'un freinage d'urgence, les électrovannes régulent la pression sur les cylindres de roue de manière optimale.

Le modulateur hydraulique se trouve entre le maître-cylindre et les cylindres de roue.

A partir des signaux enregistrés par les **capteurs de vitesse de roue**, le calculateur détermine la vitesse circonférentielle de la roue. En règle générale, il s'agit de capteurs inductifs. Mais sur les nouveaux systèmes, on utilise également des capteurs de vitesse actifs, le modulateur hydraulique transmet aux la pression de freinage, c'est-à-dire la force d'appui des plaquettes de frein sur les disques ou les tambours. [16]

4.3. Comment fonctionne le système ABS :

Lors d'un freinage brusque, le système ABS régule la pression à transmettre au dispositif de freinage principal. Cette régulation s'effectue individuellement sur chaque cylindre de roue, indépendamment de la décélération, de l'accélération et du patinage de la roue. La régulation se déroule comme suit:

Les capteurs de vitesse permettent de déterminer la vitesse au niveau des roues avant et au niveau du différentiel de l'essieu arrière ou des roues arrière.

Le calculateur utilise cette valeur pour calculer la vitesse circonférentielle des roues, si le calculateur constate une tendance au blocage sur une ou plusieurs roues, les électrovannes et la pompe de refoulement des roues concernées sont activées. À l'aide des différentes électrovannes, la meilleure efficacité de freinage est assurée sur chaque roue avant, indépendamment des autres roues. Sur les véhicules qui ne possèdent qu'un seul capteur de vitesse au niveau du différentiel de l'essieu arrière, c'est la roue avec la plus forte tendance à bloquer qui définit la pression de freinage sur les deux roues. La roue présentant la meilleure adhérence sera un peu moins freinée que ce qui serait possible et la distance de freinage sera un peu plus longue mais le véhicule sera plus stable.

Sur les véhicules avec un capteur de vitesse sur chaque roue arrière, la régulation se déroule comme pour les roues avant.

Le calculateur commande les électrovannes de chaque roue selon trois états de commutation différents :

- Premier état de commutation (**montée en pression**) : le maître-cylindre et le cylindre de roue sont reliés. la soupape d'admission est ouverte et la soupape d'échappement fermée. la pression de freinage augmente.

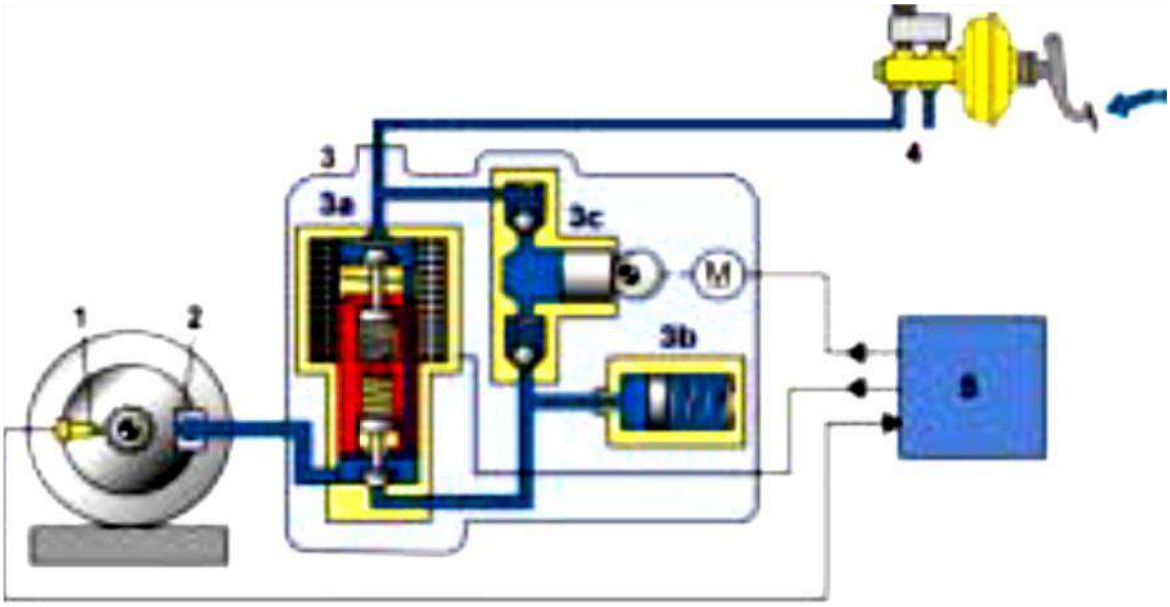


Figure 37 dessin défini le fonctionnement d'un système ABS (montée en pression) :
1. Capteurs de vitesse de roue.2 .Freins de roue.3 .Modulateur hydraulique : 3a .Electrovanne, 3b. Mémoire, 3c. Pompe de refoulement.4 .Maître-cylindre.5 .Calculateur.

- Deuxième état de commutation (**maintien de la pression**) :
- le maître-cylindre et le cylindre de roue ne sont plus reliés. la pression de freinage reste constante. La soupape d'admission est alimentée en courant et se ferme. La soupape d'échappement est également fermée.

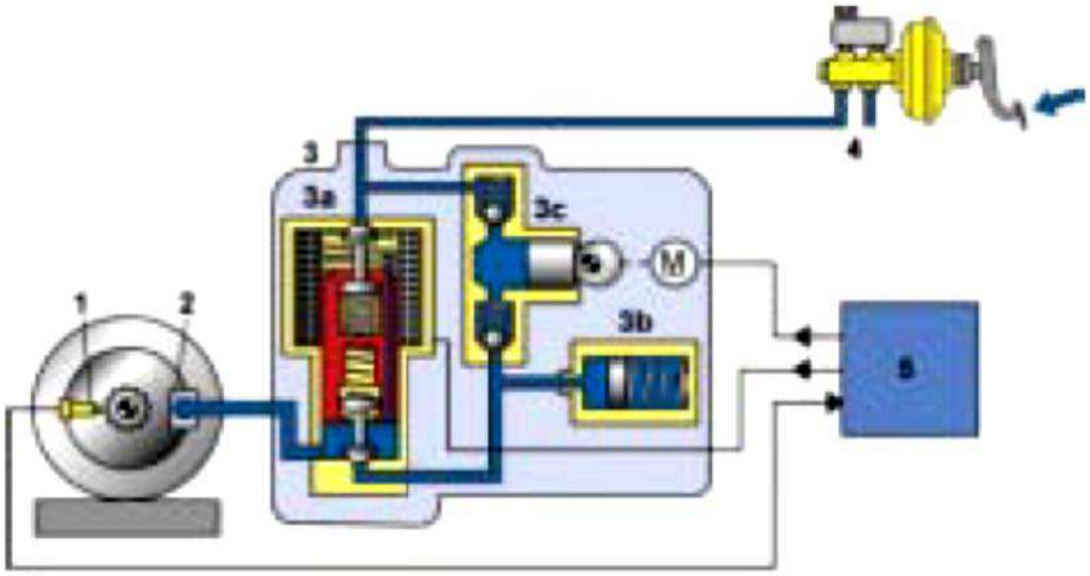


Figure 38 dessin défini le fonctionnement d'un système ABS (maintien de la pression)

Troisième état de commutation (**diminution de la pression**) : la pression de freinage diminue, la soupape d'échappement est alimentée en courant et s'ouvre, la pompe de refoulement réduit la pression en même temps, la soupape d'admission est fermée.

Ces trois états de commutation permettent d'augmenter et de réduire par paliers la pression de freinage grâce à un pilotage cadencé des électrovannes. Lorsque le système ABS est actif, ces différentes régulations ont lieu 4 à 10 fois par seconde, suivant la qualité de la chaussée.

4.4. Autotests du système :

Avant le premier freinage, le système de freinage antiblocage s'assure du bon fonctionnement de ses composants en effectuant les deux autotests suivants:

• Le **premier autotest** s'effectue lorsque le commutateur d'allumage est à la position «ON». Les témoins du système de freinage antiblocage et celui du circuit de freinage s'allument pendant 2 secondes environ et s'éteignent ensuite. Ce test confirme le bon fonctionnement des témoins des freins.

• Le **deuxième autotest** s'effectue lorsque le véhicule atteint une vitesse supérieure à 5 km/h environ, à ce stade, le relais interne du module de commande électronique des freins, les six électrovannes et le moteur de la pompe de recirculation sont mis en fonction et hors fonction en alternance et sont vérifiés pour s'assurer de l'absence de court-circuit ou de circuits ouverts, à noter que la pompe de recirculation produit un son lors de son fonctionnement. [17]

4.5. Freinage en mode normale :

Durant un freinage normal, la pression est exercée par l'intermédiaire de la pédale de frein, le liquide à frein se déplace du maître-cylindre jusqu'à l'unité de commande électrohydraulique des freins. Une fois dans l'unité, le liquide se déplace à travers les électrovannes de maintien de pression normalement ouvertes (N.O.) et les électrovannes de diminution de pression normalement fermées (N.F.) et puis, s'écoule dans les cylindres de roue et/ou les étriers. Pendant ce mode de freinage, le moteur électrique de la pompe de recirculation n'est pas en fonction, les accumulateurs de dépressurisation sont vides.

Seule la pression résiduelle est accumulée dans ces accumulateurs, le module de commande électronique des freins surveille constamment les capteurs de vitesse des deux roues avant (Wheel Speed Sensor – WSS) et celui du calibrateur de vitesse du véhicule (Vehicle Speed Sensor – VSS) pour y déceler une éventuelle décélération rapide, si le système de freinage antiblocage n'est plus autorisé pour une raison quelconque, le conducteur pourra toujours se servir de ses freins en mode de fonctionnement normal.

Les électrovannes de maintien de pression normalement ouvertes et les électrovannes de diminution de pression normalement fermées resteront ouvertes dans ces positions afin de permettre à la pression du liquide à frein d'être transmise aux roues, le système de freinage antiblocage ne fonctionne pas en l'absence de blocage de roue, le véhicule doit rouler à une vitesse d'au moins 10 km/h environ pour que le système de freinage antiblocage fonctionne.

4.6. Freinage en mode antiblocage :

Le système de freinage antiblocage vérifie les signaux d'entrée des capteurs de vitesse des roues avant et ceux du calibrateur de vitesse du véhicule et commande les changements de pression hydraulique de chaque roue jusqu'à ce que le véhicule soit complètement immobilisé

ou jusqu'à ce que le conducteur ait relâché la pédale de frein. Le système fonctionne en utilisant les procédés suivants:

• phase de maintien de la pression.

• phase de diminution de la pression.

• phase d'augmentation de la pression.

• phase de desserrage des freins.

4.7. Séquence des événements :

- Première étape: Lorsque le véhicule roule à 10 km/h ou plus, le conducteur appuie sur la pédale de frein.

- Deuxième étape: La vitesse de la roue commence à décroître lorsque la pression du maître-cylindre et la pression de freinage augmentent.

- Troisième étape: Pendant que la vitesse de roue continue de diminuer par rapport à la vitesse du véhicule, l'électrovanne de maintien de pression normalement ouverte pour la canalisation concernée se ferme pour empêcher qu'une pression additionnelle ne parvienne à la roue, la pression du maître-cylindre continue d'augmenter à mesure que le conducteur appuie sur la pédale de frein mais la pression de freinage de roue est maintenant limitée à la pression du système de freinage antiblocage.

- Quatrième étape : lorsque le module de commande électronique des freins détermine que la roue est sur le point de se bloquer, l'électrovanne de diminution de pression normalement fermée s'ouvre. Cette opération purge une partie de la pression à la hauteur du cylindre de roue ou de l'étrier afin de permettre à la roue de retourner à une vitesse plus près de celle du véhicule.

- Cinquième étape: l'électrovanne de diminution de pression est à nouveau fermée et l'électrovanne de maintien de pression reste fermée pour permettre à la vitesse de la roue de se rétablir du blocage.

- Sixième étape: Une fois le véhicule rétabli à la tendance au blocage, l'électrovanne de maintien de pression s'ouvre momentanément par impulsion pour permettre à la pression du maître-cylindre et à la pression de la pompe de recirculation d'atteindre les freins, la

pression modulée continue d'augmenter jusqu'à ce que la roue soit à une puissance de freinage optimale ou jusqu'à ce que la pression de freinage égale la pression de sortie du maître-cylindre.

Le système de freinage antiblocage permet au liquide à frein de s'écouler jusqu'à la roue, de générer de la pression et d'essayer de forcer un autre départ, en répétant les étapes 3 à 6 d'événements. Les paragraphes suivants décrivent de manière détaillée les différentes phases en mode de freinage antiblocage.

a. Phase de maintien de la pression

La phase de maintien de la pression survient lorsque le conducteur exerce une pression excessive sur la pédale de frein par rapport à la situation causant la décélération des roues à une vitesse qui excède la capacité du véhicule, si l'information transmise par les capteurs de vitesse de roue indique une décélération de roue excessive (blocage imminent), la première étape de la séquence antiblocage consiste à isoler la pression de freinage exercée par le conducteur, le module de commande électronique des freins applique une tension au solénoïde de l'électrovanne de maintien pour fermer l'électrovanne de maintien de pression, cette action empêche qu'une pression de freinage additionnelle soit exercée par le conducteur et atteigne la roue, lorsque l'électrovanne de maintien de pression est fermée, des augmentations additionnelles de pression de freinage ne sont pas possibles.

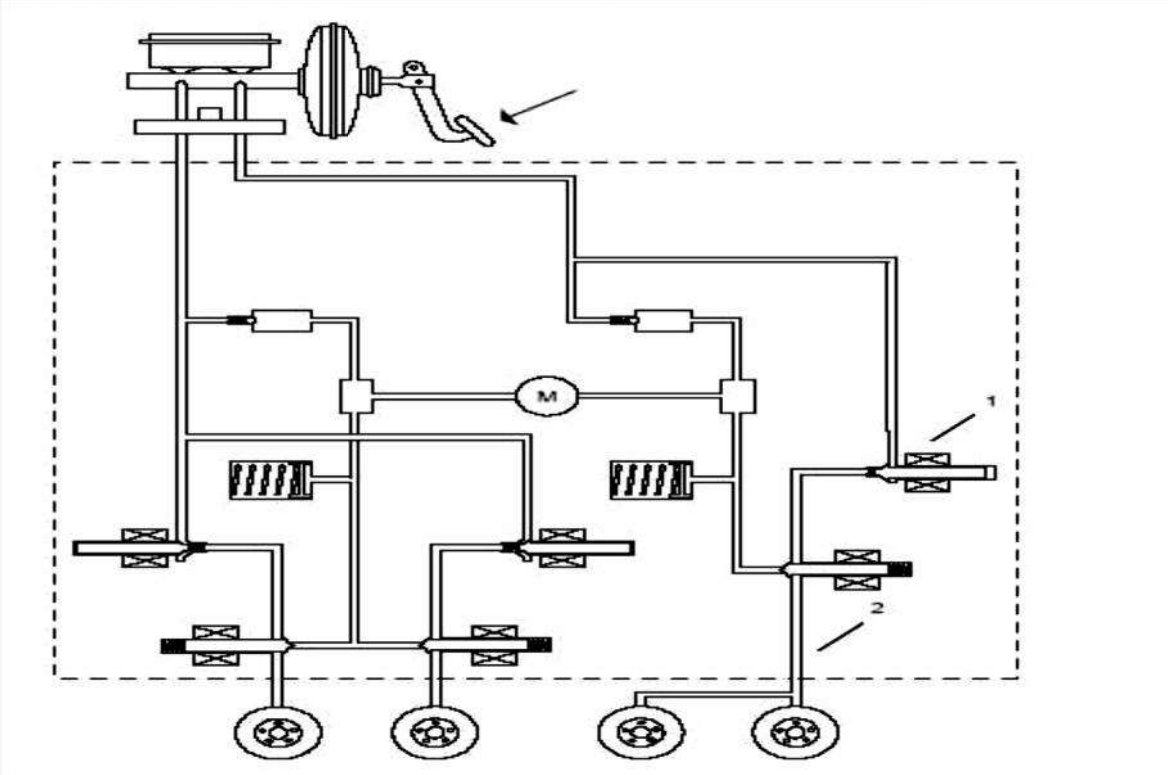


Figure 39 .phase de maintien de la pression : (1) Electrovanne de maintien de pression activée (passage fermé),(2)Pression maintenue aux roues arrière (n'augmentant pas et ne diminuant pas)

b. Phase de diminution de la pression

Une fois la pression maintenue, elle peut être réduite pour permettre le roulement des roues à nouveau. La diminution de pression se fait en déchargeant une partie de la pression du liquide à frein dans un accumulateur de dépressurisation, le module de commande électronique des freins alimente le solénoïde de l'électrovanne de diminution de pression pour l'ouvrir permettant au liquide des roues d'être déchargé dans l'accumulateur de dépressurisation.

De très courtes impulsions d'activation ouvrent et ferment le passage de l'électrovanne de diminution de pression pour moduler cette action, la pression de freinage est ainsi diminuée au niveau de la roue concernée et permet à celle-ci de recommencer à rouler normalement, le liquide à frein, emmagasiné dans l'accumulateur de dépressurisation, sert à amorcer la pompe de recirculation afin de pouvoir appliquer à nouveau une pression, l'électrovanne de diminution de pression s'ouvre de manière indépendante pour agir sur la décélération de la roue.

À partir de cette phase, la pompe de recirculation est mise en service par le module de commande électronique des freins jusqu'à la fin du mode antiblocage.

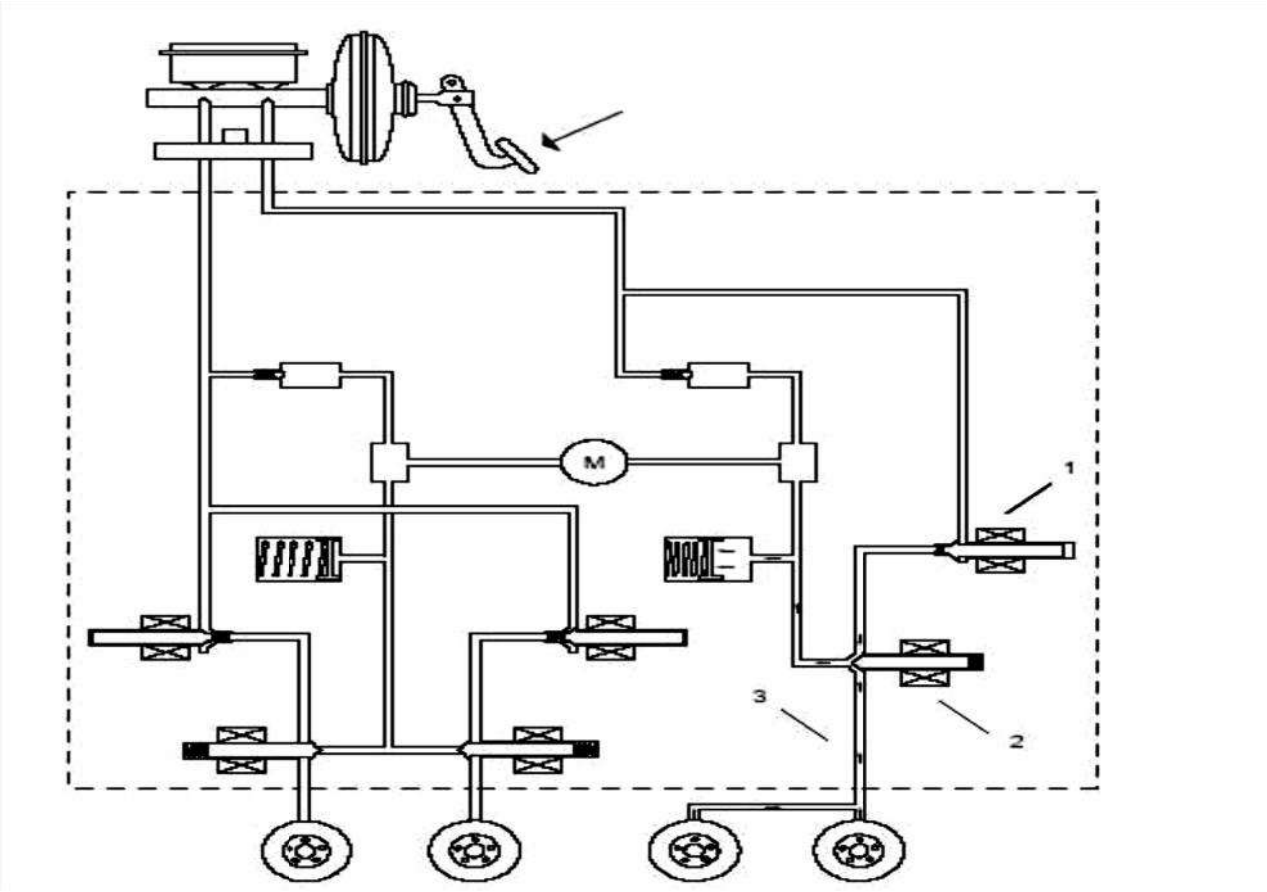


Figure40. Phase de diminution de la pression : (1) Electrovanne de maintien de pression activée (passage fermé), (2) Electrovanne de diminution de pression activée (passage ouvert), (3) Diminution de la pression aux roues arrière.

c. Phase d'augmentation de la pression

La phase d'augmentation de la pression est établie de façon à obtenir un freinage optimal pour chacune des roues, l'électrovanne de maintien de pression s'ouvre momentanément sous l'effet d'une impulsion pour permettre à la pression du maître-cylindre et à la pompe de recirculation d'atteindre les freins.

La pression, ainsi modulée, continue d'augmenter jusqu'à ce que la roue soit à la puissance de freinage optimale ou jusqu'à ce que la pression de freinage soit amenée à la pression de sortie du maître-cylindre.

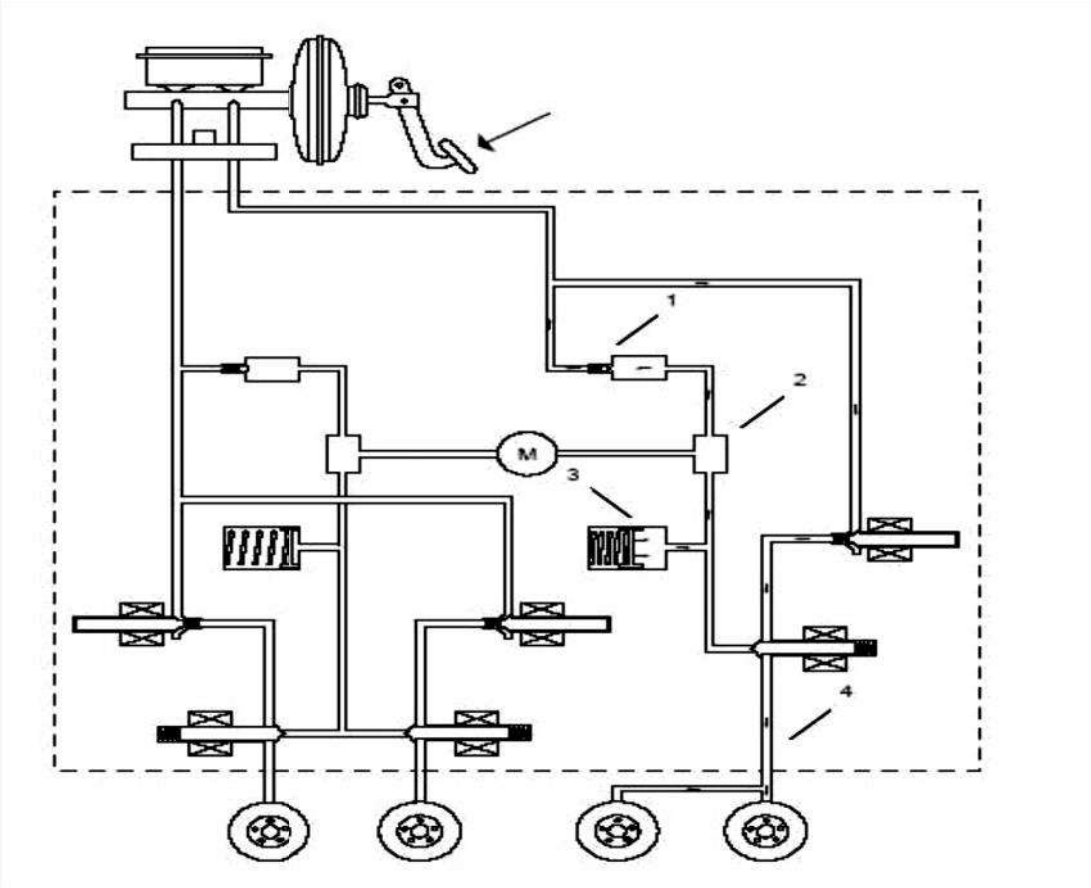


Figure 41 phases d'augmentation de la pression : (1) Clapet anti-retour ouvert, (2) Pompe hydraulique en marche, (3) Décharge de l'accumulateur de dépressurisation, (4) Augmentation de la pression aux roues arrière

Si plus de pression est nécessaire, une plus grande quantité de liquide est retirée du maître-cylindre et appliquée aux freins, à mesure que le liquide à frein est réintroduit, les roues commencent à ralentir à une vitesse optimale, si les roues sont sur le point de bloquer, le module de commande électronique des freins passe en phase de maintien de pression, de diminution de pression et d'augmentation de pression.

Ces cycles de commande (maintien, diminution et augmentation) surviennent par intervalles de millisecondes, ceci permet que plusieurs cycles surviennent par seconde qu'on appelle fréquence.

d. Phase de desserrage des freins

À la fin de l'arrêt d'un freinage antiblocage, lorsque le conducteur relâche la pédale de frein, la pompe de recirculation continue de fonctionner pendant une courte période pour

permettre à tout liquide à frein emmagasiné dans l'accumulateur de dépressurisation de s'en échapper, à mesure que le liquide s'écoule et retourne au réservoir du maître-cylindre, la tension du ressort dans l'accumulateur de dépressurisation pousse le piston à sa position initiale.

Et, enfin, l'électrovanne de maintien de pression cesse de fonctionner et le liquide s'écoule par l'orifice de maintien de pression vers le réservoir du maître-cylindre.

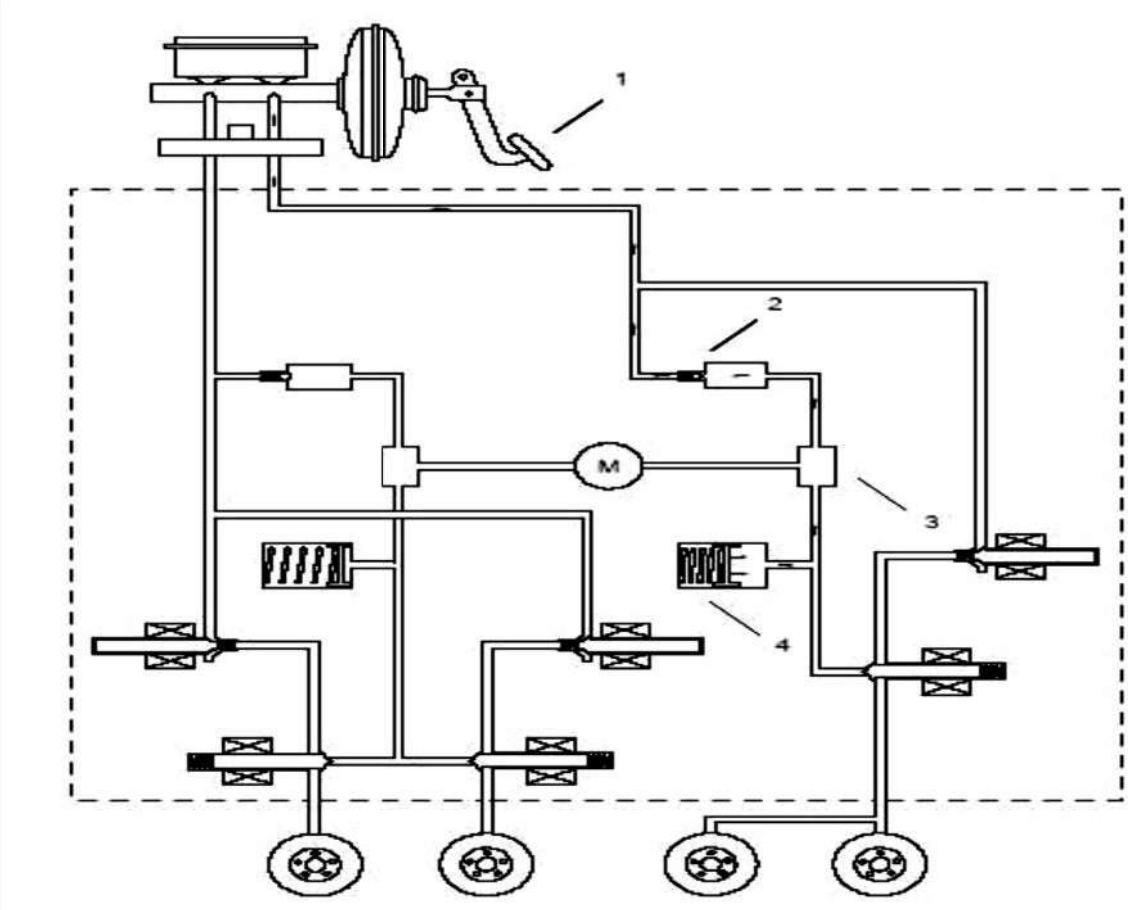


Figure42 phase desserrage des freine : (1) Relâchement de la pédale de frein, (2) Clapet anti-retour ouvert, (3) Pompe hydraulique en marche, (4) Décharge de l'accumulateur de dépressurisation.

Lors du freinage en mode antiblocage, le conducteur sentira des vibrations sur la pédale de frein ou une perte de fermeté de la pédale, il s'agit d'une situation normale et prévue en mode antiblocage. [18]

4.8. Modélisation du système ABS grâce aux réseaux de Pétri :

Les méthodes les plus adaptées pour la modélisation des systèmes complexes sont basées sur des modèles états-transitions tels que les graphes de Markov et les approches basées sur les réseaux de Pétri.

Les réseaux de Pétri permettent de décrire le comportement des systèmes dans les conditions de fonctionnement normal ainsi que dans le cas de défaillance de leurs composants [3,7].

Il existe une grande variété de réseaux de Pétri. Pour notre travail, nous nous sommes intéressés aux réseaux de Pétri stochastiques déterministes dans lesquels nous intégrerons différentes lois de probabilité ainsi que des valeurs discrètes.

Par soucis de simplification de la modélisation, nous avons gardé, uniquement, un seul mode de défaillance par composant. Le réseau de Pétri de la figure 43 représente la modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle du système ABS.

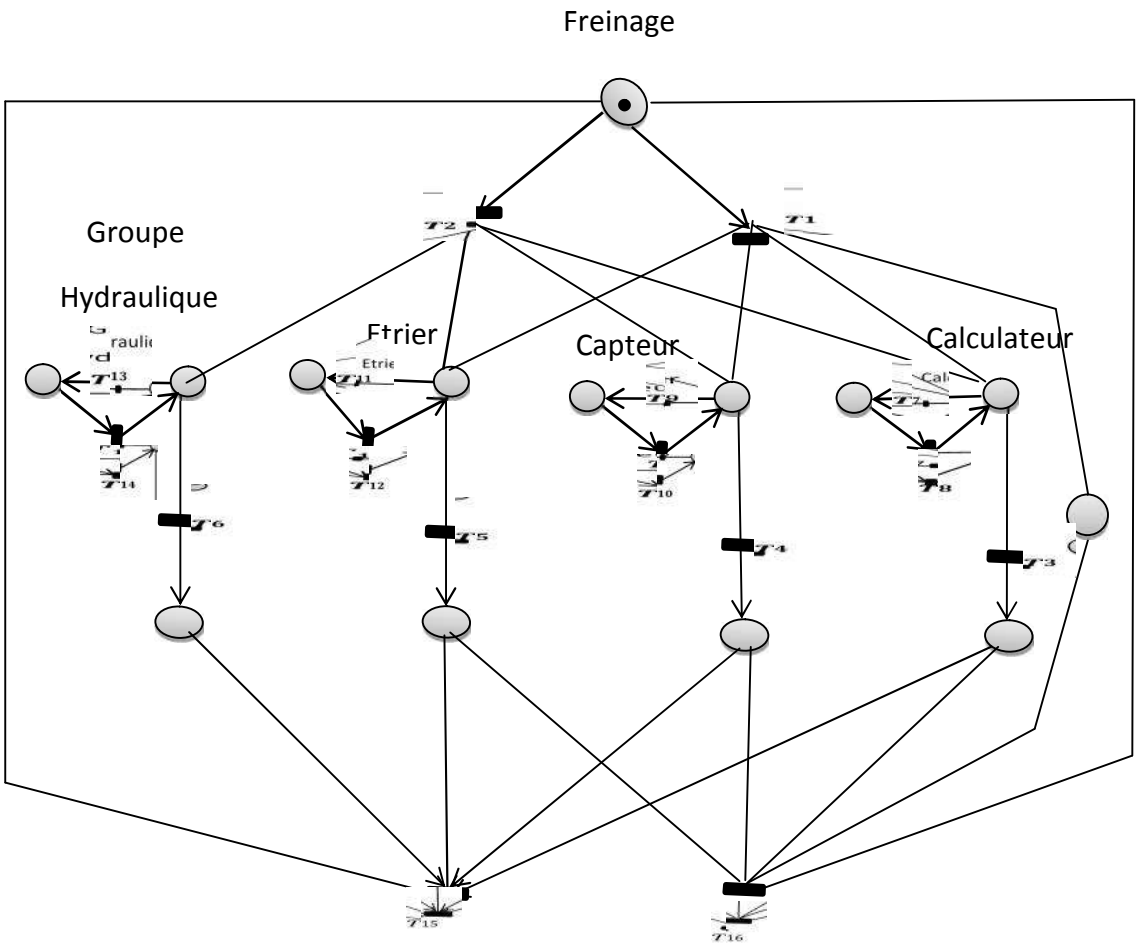


Figure 43 : Réseau de Pétri pour le système ABS.

4.8.1. Intégration du modèle physique du système ABS :

Le rôle principal du système ABS consiste à contrôler la vitesse de la roue afin d'éviter le blocage de cette dernière et d'assurer une force de freinage maximale. Le calculateur, intégré dans le système ABS, relève les vitesses du véhicule et de la roue afin de déterminer la valeur du glissement qui doit être à peu près égale à 20% afin de donner un bon compromis entre la stabilité et la force de freinage .

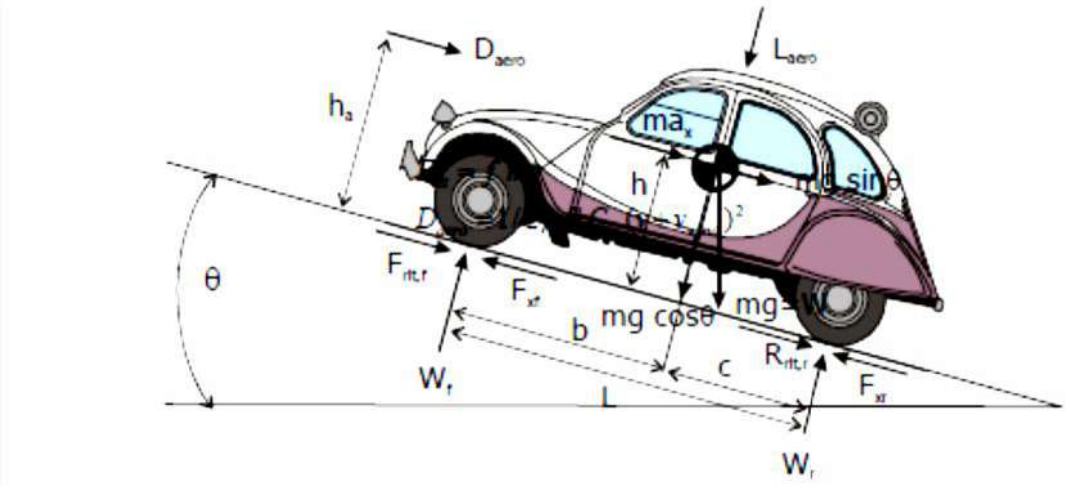


Figure 44 : Efforts agissant sur une voiture freinée

$$m\dot{V} = N_w F_x - F_{rlt} - D_{aero} \pm mg\,sin\vartheta \ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

$$F_{rlt} = fmg \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

$$D_{aero} = {}^{1}/_{2}\,\rho S C_x (v + v_{wind})^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

4.8.2. Détermination des équations différentielles :

Le modèle physique que nous construirons, est basé sur des équations différentielles représentatives de notre système ABS. Ces équations sont déterminées à partir de la figure 44 qui représente une des quatre roues du véhicule avec tous les efforts appliqués sur cette dernière.

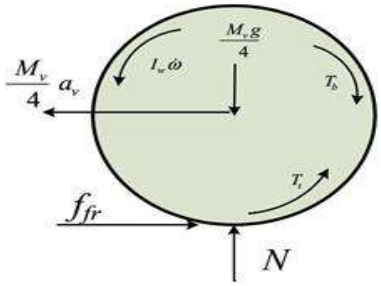


Figure 45. Efforts agissant sur une roue freinée.

A partir des équations fondamentales de la dynamique nous obtenons les équations suivantes :

$$a_v = \frac{4 f_{fr}}{M_v} \tag{4}$$

Cette force de frottement f_{fr} est égale à :

$$f_{fr} = \mu N = \mu \frac{M_v g}{4} \tag{5}$$

N : Effort normal.

μ : Coefficient de frottement.

La vitesse du véhicule s'écrira donc de la manière suivante :

$$V_v = \int -\frac{4 f_{fr}}{M_v} dt + V_{v_0} \tag{6}$$

Une fois la vitesse du véhicule estimée, nous nous intéressons par la suite à la vitesse d'une des quatre roues du véhicule. La somme des moments appliqués sur cette dernière nous donne l'expression de l'équation ci-dessous :

$$\dot{\omega} = \frac{1}{I}(T_t - T_b) \tag{7}$$

$\dot{\omega}$: Accélération angulaire, T_t : Moment de frottement, T_b : Moment de freinage.

Le moment de frottement T_t est égal à la force de frottement appliquée sur la roue multipliée par son rayon ce qui nous donne :

$$T_t = R\mu \,.\, ff_r = \mu \,.\mathrm{R}\frac{M_{vg}}{4} \tag{8}$$

La vitesse angulaire de la roue s'écrira :

$$\omega = \int \frac{1}{I}(T_t - T_b)dt + \omega_0 \tag{9}$$

Après le calcul des deux vitesses, c'est-à-dire celle du véhicule et celle de la roue, nous pouvons maintenant calculer le glissement S qui a pour expression :

$$s = \frac{v_v - R\omega}{v_v} \tag{10}$$

Pour un bon freinage de la roue et une bonne stabilité du véhicule, le glissement doit être, à peu près, égal à 20%.

4.8.3. Simulation du model ABS :

Les équations différentielles, obtenues dans la partie précédente, nous permettent de modéliser le système ABS. Cette modélisation est effectuée dans l'environnement Simulink de matlab7.5 et elle est représentée par la figure 46 :

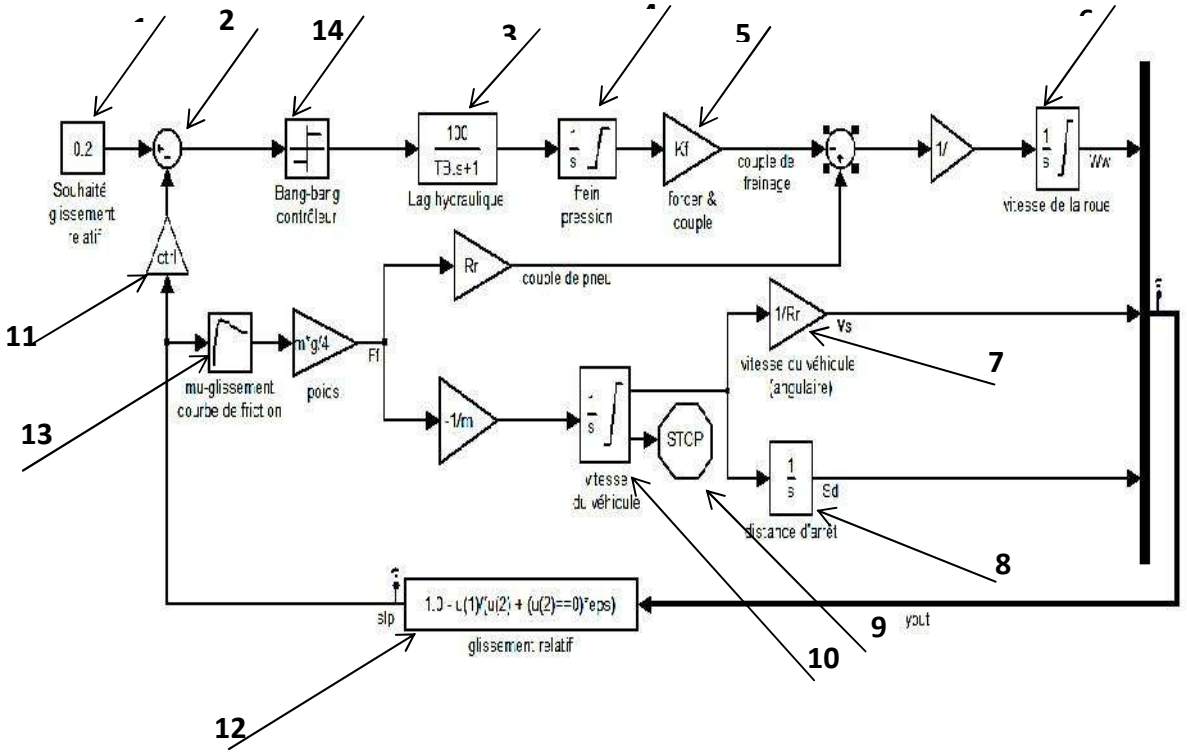


Figure.46 Simulation du système ABS.

Cette simulation est dotée de plusieurs bloqués fonctionnels :

1 : le glissement doit être, à peu près, égal à 20%, Pour un bon freinage de la roue et une bonne stabilité du véhicule.

2 : soustracteur (calcul la différence entre les deux vitesses)

3 : fonction de Transfer de groups hydrauliques

4 : la pression de freinage.

5 : force de moment.

6 : intégrateur limité (vitesse de la roue).

7 : la vitesse angulaire du véhicule ($\omega = V_V.\frac{1}{R_r}$).

8 : la distance de freinage.

9 : stop, il est stoppé ayant la vitesse de véhicule égale à zéro

10 : intégrateur limité (vitesse de véhicule).

11 : Gain (contrôleur).

12 : glissement relatif.

13 : le coefficient de frottement (μ).

14 : contrôleur bang-bang pour ABS. Ceci nous permet de déterminer les temps de fonctionnement des composants ainsi que le temps de freinage en utilisant le système ABS.

4.8.4. Les résultats de simulation :

L'obstacle obligeant le conducteur à freiner peut survenir à n'importe quel moment ce qui nous conduit à avoir des vitesses aléatoires au moment où le conducteur appui sur la pédale de frein. Ces vitesses aléatoires sont considérées comme étant les vitesses initiales au début du freinage. Nous avons effectué des simulations pour quatre vitesses initiales qui sont égales à 20, 40, 50 et 60 m/s, et pour des différentes plateformes de déroulement.

a) Résultats obtenus pour différentes vitesse :

Dans cette partie, nous allons exposer les résultats de simulation obtenus avec un système ABS et sans ABS, afin de montrer lequel est le plus performant. Les critères de comparaison seront successivement basés sur le temps de freinage total de la voiture.

Pour une vitesse : 20 m/sec.

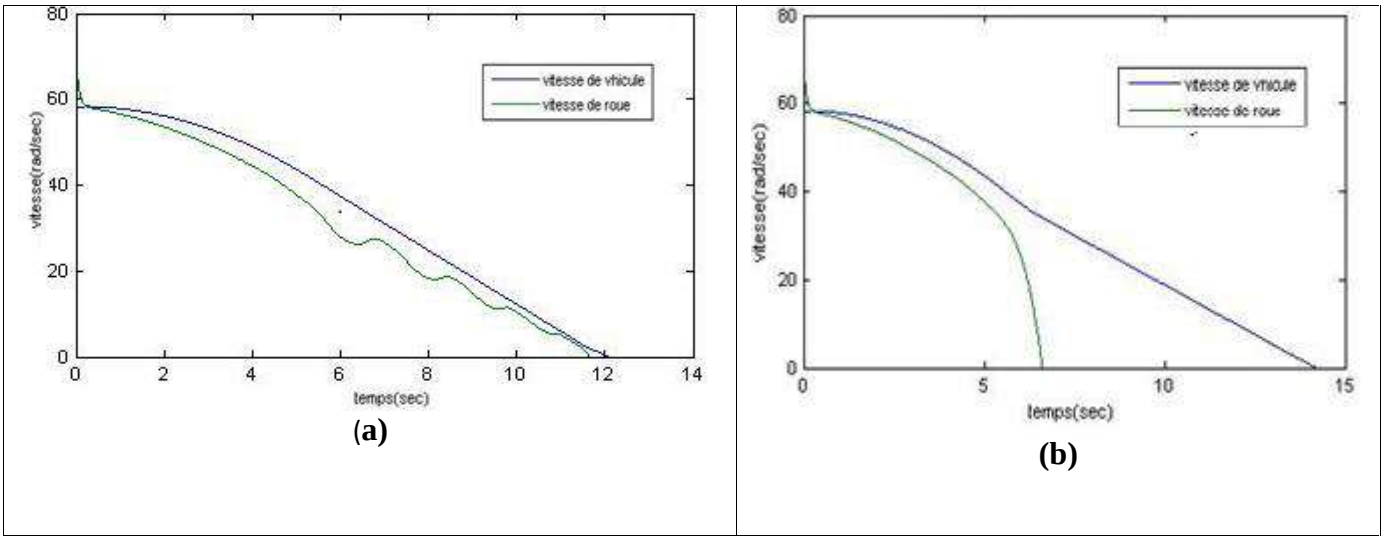


Figure 47: les résultats de simulation pour une vitesse de 20m/s :, (a) avec ABS (b)sans ABS.

Pour une vitesse : 40 m/sec.

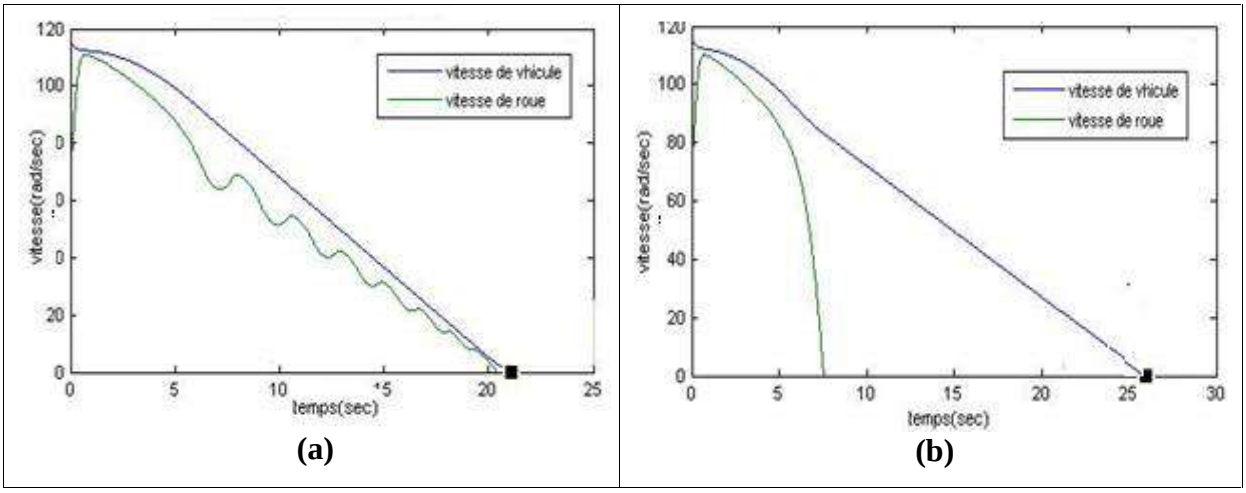


Figure 48: les résultats de simulation pour une vitesse de 40m/s :, (a) avec ABS (b) sans ABS.

Pour une vitesse : 50 m/sec.

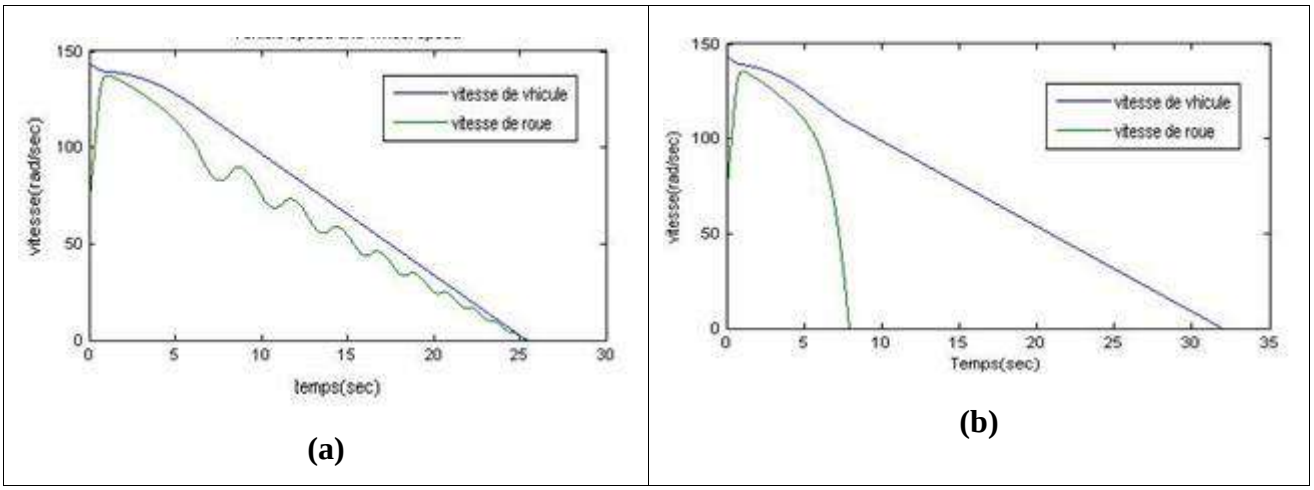


Figure 49 : les résultats de simulation pour une vitesse de 50m/s :, (a) avec ABS (b) sans ABS.

Pour une vitesse : 60 m/sec.

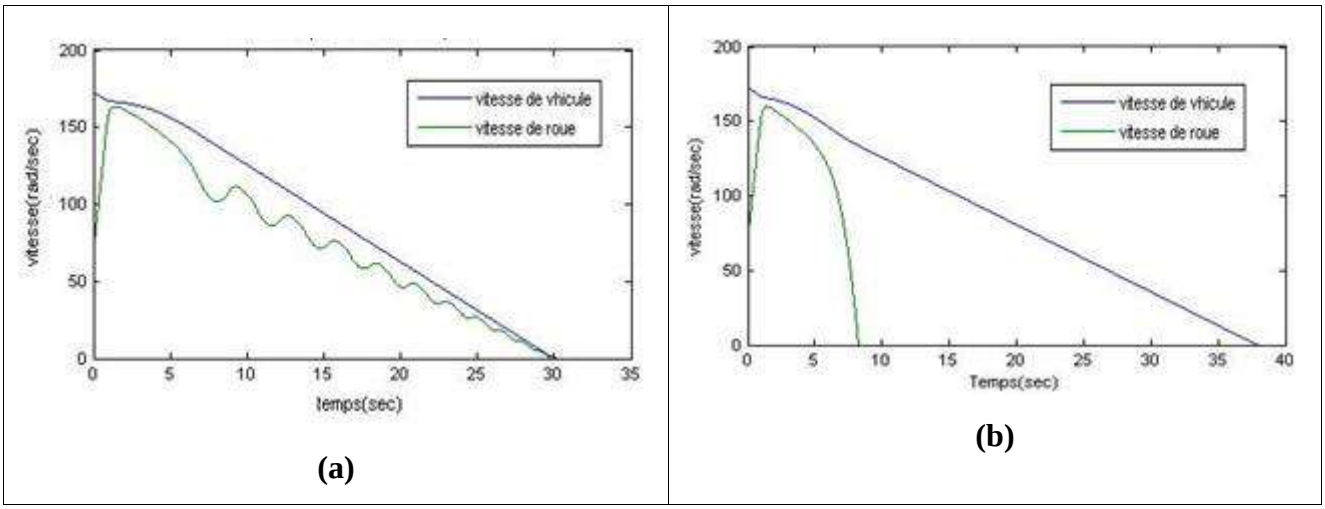


Figure 50: les résultats de simulation pour une vitesse de 60m/s :, (a) avec ABS (b) sans ABS .

A partir de ces graphes, plusieurs conclusions s'offrent à nous et sont récapitulées dans le tableau 2.

	Vitesses initiales au freinage V0			
	20m/s	40 m/s	50m/s	60m/s
Temps de freinage normal sans ABS (s)	14.16	26.05	30.95	37.96
Temps de freinage avec ABS (s)	12.06	21.08	25.25	29.68

Tableau 2 : Résultats des simulations pour différentes vitesses initiales.

D'après le tableau.1 nous remarquons que système de freinage ABS fournit des résultats avec un temps minimal et important par apport a un système de freinage sans ABS, alors que on peut dire que le système de freinage ABS et le plus performant quelle que soit la vitesse.

b) Résultats obtenus pour différentes plateforme avec une vitesse de 40 m/sec :

Pour une route sèche :

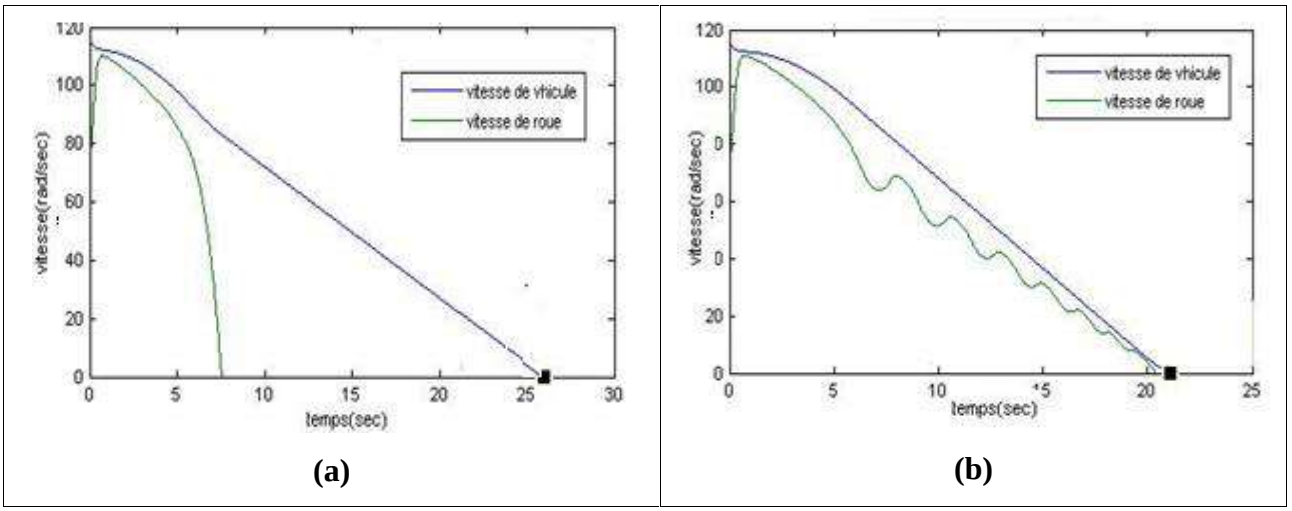


Figure 51 : les résultats de simulation pour une route sèche : (a)sans ABS, (b) avec ABS.

Pour une route mouillée

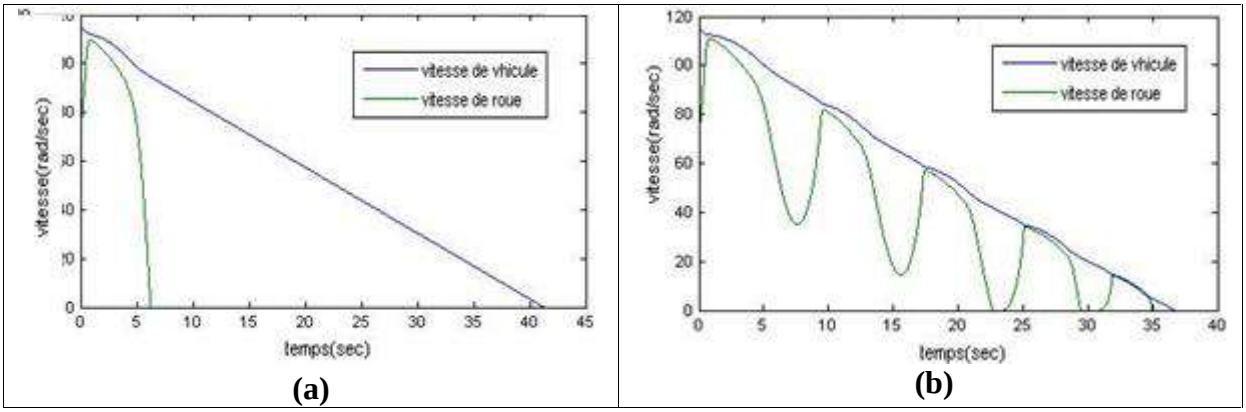


Figure 52: les résultats de simulation pour une route mouillée: (a)sans ABS, (b) avec ABS.

Pour une route enneige :

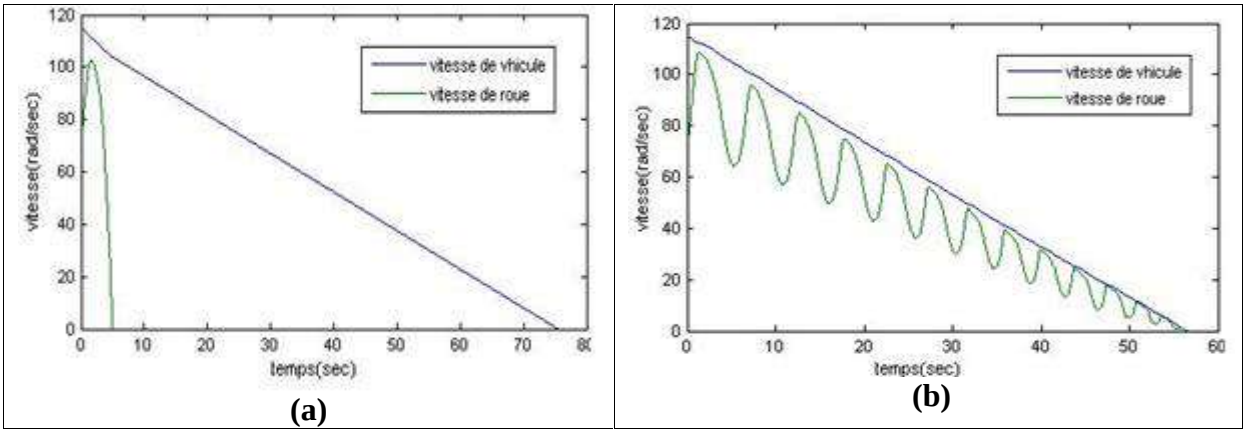


Figure 53: les résultats de simulation pour une route enneige : (a)sans ABS, (b) avec ABS.

Pour une route glace :

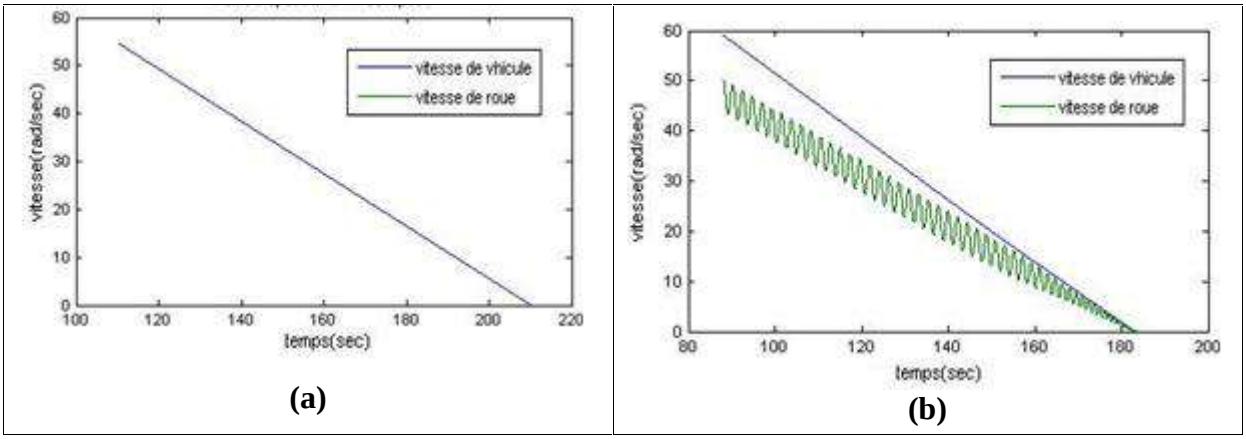


Figure54 : les résultats de simulation pour une route glace: (a)sans ABS, (b) avec ABS.

A partir de ces graphes, plusieurs conclusions s'offrent à nous et sont récapitulées dans le tableau 3.

	Vitesses initiales au freinage V0=40 m/sec.			
	Route sèche	**Route mouillée**	**route enneige**	**route glace**
Temps de freinage normal sans ABS (s)	26.5	41.21	75.32	210.2
Temps de freinage avec ABS (s)	21.3	36.52	56.45	183.3

Tableau 3 : Résultats des simulations pour différentes plateforme avec vitesse initiale 40m/s.

D'après le tableau.3 nous remarquons que système de freinage ABS fournit des résultats avec un temps minimal et important, par apport a un système de freinage sans ABS,

donc quelle que soit la propriété de plateforme (coefficient de friction de la route), le système ABS reste le plus performant sur le plan fonctionnel.

C) le cout de fonctionnement :

Le cout de fonctionnement de l'opération de freinage dépendra toujours la consommation du groupe hydraulique pendant l'opération de freinage, les résultats de simulation sont les suivants :

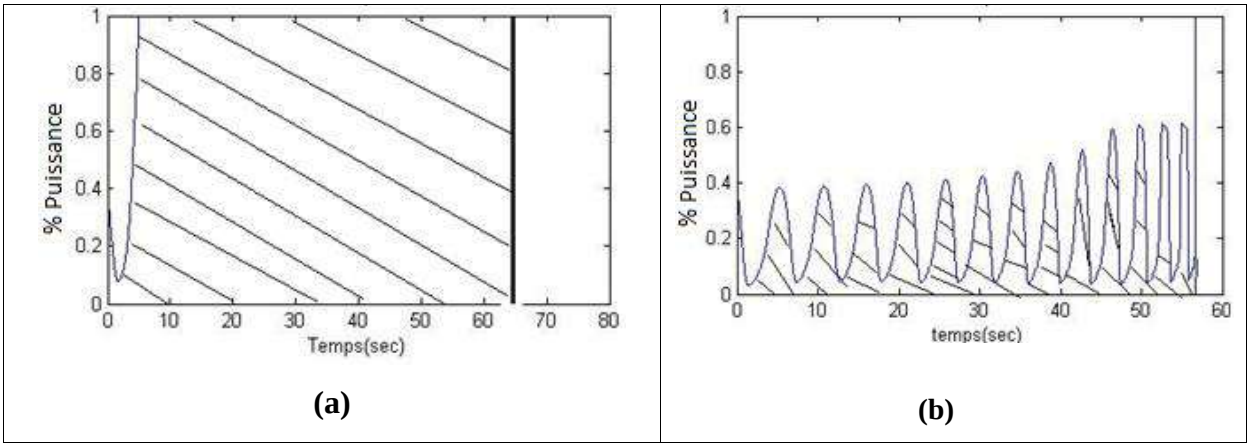


Figure 55 : le cout de fonctionnement : (a) sans ABS, (b) avec ABS.

D'âpres la figure 55, on remarque que le système de freinage sans ABS fonctionne à pleine puissance (100%) pondant toute la longe durée de freinage, mais par contre le système de freinage avec ABS fonctionne avec une puissance inférieure ou égale à 1/3 de la puissance maximale du groupe hydraulique. Donc on peut dire que le système de freinage ABS c'est un système optimisé sur le plan énergétique.

4.9. Conclusion :

Nous avons présenté, dans ce chapitre une étude consiste à proposer une méthodologie globale qui nous permet de modéliser le comportement fonctionnel d'un système ABS en vue d'estimer sa fiabilité. Pour la modélisation du système, nous nous intéresserons particulièrement aux réseaux de Petri.

En comparant les différents résultats des systèmes de freinage, nous avons montré les mérites des systèmes de freinage ABS, ou ce dernier permet de minimise l'énergie consommable pendant l'opération de freinage, ainsi la fiabilité de ce système par apport a un système de freinage sans ABS.

Conclusion Générale

Les systèmes mécatroniques sont de plus en plus utilisés dans l'industrie. Tous les secteurs sont concernés : l'automobile, l'aéronautique, le nucléaire, le spatial et même des domaines comme le domaine bancaire ainsi le médical. Le développement d'un système mécatronique est envisagé selon l'approche de l'ingénierie concourante dans le cadre d'un cycle de développement.

La complexité importante de systèmes mécatroniques et la réduction des coûts de conception et d'exploitation incitent les industriels à maîtriser l'avantage de la sûreté de fonctionnement.

Afin d'optimiser le développement des systèmes complexes, des méthodes sont utilisées dans chaque étape du cycle de développement pour analyser la fiabilité. L'ensemble de ces méthodes constitue un processus à part entière : le processus de fiabilité.

Les principales méthodes d'analyse de la fiabilité ont été comparées entre elles. Une classification de ces méthodes par rapport à chaque phase du cycle en V a montré que les méthodes utilisées dans les étapes descendantes du cycle de développement sont plutôt qualitatives, alors que dans les étapes montantes elles sont, en plus, quantitatives. Les RdP sont la méthode qui peut être utilisée dans toutes les phases d'un cycle de développement d'un système complexe, elle est la plus adaptée pour évaluer la fiabilité d'un système mécatronique, car elle répond, d'une part, aux principales contraintes liées à la fiabilité d'un système mécatronique et, d'autre part, elle est utilisable dans chaque étape du cycle de développement. En outre, la méthode RdP est la seule qui permet d'analyser le comportement fonctionnel/dysfonctionnel et l'aspect dynamique du système.

Dans ce travaille nous sommes intéressés à l'analyse quantitative d'un système mécatronique et aux différentes méthodes et techniques employées pour sa réalisation. Nous avons modélisé le système de freinage ABS, grâce aux réseaux de Pétri, après avoir effectué l'analyse qualitative et récupéré toutes les informations que fournie cette analyse. Comme les transitions de ce réseau doivent être associées à des temps, nous avons utilisé un modèle physique de notre système dans le but de calculer les temps de fonctionnement de ce système.

Et en fin nous avons faire une comparaison entre le système de freinage antiblocage (ABS) et le système normale (sans ABS) et nous avons montré les mérites des systèmes de freinage ABS, ou ce dernier permet de minimise l'énergie consommable pendant l'opération de freinage, ainsi la fiabilité de ce système par apport a un système de freinage sans ABS.