

# État de l'art des méthodes d'estimation de la fiabilité des systèmes mécatroniques

BENSAID AMRANI NABIL  
LTI, ENSA de Tanger,  
Université AbdelMalek Essaadi, Maroc,  
[amraninabil10@gmail.com](mailto:amraninabil10@gmail.com)

DRISS SARSRI  
LTI, ENSA de Tanger  
Université AbdelMalek Essaadi, Maroc,  
[dsarsri@ensat.ac.ma](mailto:dsarsri@ensat.ac.ma)

## Résumé:

Le fondement de la mécatronique réside dans le fait d'exploiter au maximum le couplage multi domaine pour offrir des performances techniques et économiques toujours plus élevées, sources de valeur ajoutée. L'augmentation des niveaux de couplage entraîne inéluctablement une explosion de la complexité des systèmes, de leur contrôle.

Cette inflation de la complexité à tous les niveaux augmente le risque de dysfonctionnement, les méthodes et les outils disponibles aux concepteurs pour maîtriser la fiabilité, sont très divers et souvent trop spécifiques et sophistiqués pour une utilisation systématique et à une échelle industrielle en conception mécatronique.

L'objectif de cet article est de représenter les études permettant une meilleure maîtrise des risques et de la fiabilité. Les points faibles sont mis en évidence, ces études de fiabilité doivent être menées au plus tôt dans la phase de conception, afin de réduire les coûts et le nombre de prototypes nécessaires à la validation du système. Le processus de fiabilité est ensuite déployé tout au long du cycle de développement, ce processus est décomposé en trois grandes phases : la fiabilité prévisionnelle, la fiabilité expérimentale et la fiabilité opérationnelle. Pour chacune des étapes, les moyens et les techniques utilisées sont bien citées.

Outre que le système Mécatronique est un système Hybride, il est dynamique, reconfigurable, et Interactif, la modélisation effectuée doit prendre en considération ces critères. Plusieurs méthodologies ont été développées dans cette voie de recherche. Nous tenterons de les traiter dans cet article à travers une vue critique et analytique.

**Mots Clefs** : Fiabilité, Disponibilité, Sûreté de fonctionnement, Défaillance, analyse qualitative, analyse quantitative, Modélisation fonctionnelle, Modélisation dysfonctionnelle, RDP (Réseaux de Petri), RdPSD (Réseaux de Petri stochastique déterminé), BRM (bayésienne réseaux) ; Modèle Stochastique ; chaîne de Markov, EVA( essais à vitesses accélérés) , Redondance.

## I. INTRODUCTION

La fiabilité des systèmes mécatroniques est un axe moderne, c'est un défi d'aujourd'hui pour les produits de demain, c'est aussi un domaine relativement jeune tiré par la technologie et les besoins du marché.

Le concept de produit ou de démarche mécatronique se caractérise principalement par la notion de couplage entre différentes technologies, différentes disciplines scientifiques ou domaines physiques.

Le fondement de la mécatronique est d'exploiter au maximum ces couplages pour offrir des performances techniques et économiques toujours plus élevées, sources de valeur ajoutée. L'augmentation des niveaux de couplages entraîne inéluctablement une explosion de la complexité des systèmes, de leur contrôle, et des processus de conception et fabrication.

Et avant d'aborder « la fiabilité Mécatronique » qui représente le thème central de cette communication, essayons de faire un tour d'horizon afin de cerner ce que la bibliographie entend par le terme « Mécatronique ».

La norme NF E 01-010 (2008) définit la mécatronique comme une « démarche visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité »

La complexité des systèmes mécatroniques est un défi majeur pour la sûreté de Fonctionnement, puisque la mécatronique est une combinaison synergique et systémique de mécanique des solides et des fluides, d'électronique, et d'informatique en temps réel...qui reflète cette complexité. L'intérêt de ce domaine d'ingénierie interdisciplinaire est de concevoir des systèmes automatiques puissants et de permettre le contrôle de systèmes complexes, Dans ce sens, plusieurs études ont été réalisées pour tenter de répondre à cette problématique, en respectant la norme 2626.

La démarche mécatronique est modélisée en phase de conception par le cycle en V, Le modèle de développement selon le cycle en V positionne les différentes phases de développement, depuis la spécification jusqu'à la validation produit (fig. I.2).

La figure suivante représente le cycle en V d'un produit [17] :

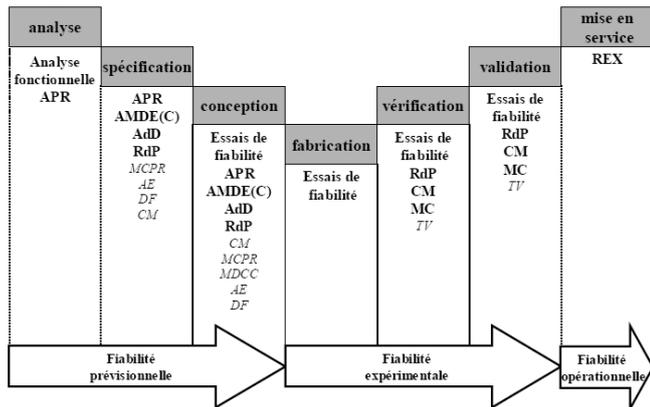


Figure1 : Cycle en V d'un produit

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

D'après plusieurs travaux [10, 6,...], cette notion a été traitée selon les phases de la démarche mécatronique détaillée comme suit:

### 1. Evaluation prévisionnelle de la fiabilité :

Cette phase consiste dès le début du projet à étudier la fiabilité à travers des analyses qualitatives (AEEL, AMDEC, ...) et quantitatives (AdD, DF, ...), en intégrant les différents recueils de données. Pour des systèmes complexes, il est possible de modéliser la fiabilité par des RdP. La fiabilité prévisionnelle permet de prendre des orientations optimales en matière de conception.

### 2. Evaluation expérimentale de la fiabilité :

Cette phase intervient dès que le développement du produit est suffisamment avancé et que l'on dispose des premiers prototypes, il est possible de réaliser des essais de robustesse (appelés également essais aggravés) afin de connaître les faiblesses et les marges de conception. Une fois que le produit est mature (marges suffisantes), une campagne d'essais peut être menée pour estimer la fiabilité. Lors de la production, l'élimination des défauts de jeunesse (dérive process, composant faible, ...) est opérée par des essais de déverminage.

### 1. Evaluation opérationnelle de la fiabilité :

Une fois que le produit est en exploitation, une estimation de la fiabilité est réalisée à partir des données de REX. Elle se pratique dès les premières mises en service et permet ainsi de corriger des défauts de conception et de fabrication/réalisation.

## II) Problématique :

Les systèmes mécatroniques sont caractérisés par les aspects hybrides, dynamiques, interactifs et reconfigurables.

Les systèmes hybrides sont des systèmes faisant intervenir explicitement et simultanément des phénomènes continus et des événements discrets. [12] [01]

Les systèmes dynamiques sont caractérisés par les relations fonctionnelles entre les composants qui les constituent. Si ces relations restent figées tout au long de la mission du système, le système sera dit statique. Si au contraire, ces relations changent au cours de la mission, le système sera dit dynamique. [12] , [01], [05].

Le caractère interactif d'un système est défini par l'existence d'interactions physiques et/ou fonctionnelles entre les composants du système. [12]

Enfin, les systèmes reconfigurables sont des systèmes capables de modifier leurs structures internes afin d'assurer la réalisation de la fonction [12],[05].

Alors comment doit-on modéliser et évaluer la fiabilité prévisionnelle, expérimentale et opérationnelle. Et quels outils pertinents permettent-ils une meilleure modélisation ?

## III) Etat d'art des Méthodes d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle:

Ce tour d'horizon regroupe des présentations relativement détaillées de quelques travaux très proches de la problématique de la fiabilité mécatronique.

### III,1) Extraction des scénarios critiques à partir de RdP :

Les travaux de Mr SARHANE KHALFAOUI [1], [2],[3],[4]. ont été réalisés en collaboration entre le laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS et l'entreprise PSE Citroën qui s'inscrivent dans la lignée de travaux en sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques, à savoir définir une méthodologie d'estimation de la fiabilité de ces systèmes. Mr Khalfaoui a élaboré une méthode de recherche des scénarios redoutés pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde automobile, son premier article publié, " Extraction des scénarios critiques à partir d'un modèle RdP (Réseaux de Pétri) à l'aide de la logique Linéaire » dans laquelle il a abordé une modélisation mathématique par les réseaux de pétri, et des équations différentielles. Ce choix a été justifié par le fait que ce modèle est largement utilisé dans la modélisation des systèmes à événements discrets et dans les études de sûreté de fonctionnement des systèmes dynamiques, et à partir de ce

modèle, une analyse qualitative est faite afin de déterminer les scénarios conduisant à l'événement redouté par une analyse des causalités et suivant l'arborescente à l'aide de la logique linéaire et un raisonnement inverse en arrière partant de l'état défaillant et revenant à l'état de fonctionnement normal afin de déterminer les scénarios redoutés critiques, qui est une conséquence de l'occurrence d'une seule ou d'une séquence de défaillances amenant le système dans une situation de blocage en l'absence de réparation..Il a mentionné également que l'utilisation des Arbres de défaillance pour évaluer la probabilité d'apparition d'un événement redouté n'est pas toujours suffisante. En effet, cette méthode ne permet pas de prendre en compte les phénomènes temporels liés à leurs dynamiques de fonctionnement (possibilité de reconfigurations et de fonctionnements dégradés) et à leur aspect hybride (existence de variables d'états discrètes et continues), la mise en place de cette méthode a été appliquée sur deux systèmes : Le système de régulation des réservoirs, et le conjoncteur disjoncteur électromécanique.

- **Discussion :**

Ses résultats vont introduire quelques problèmes, citons la difficulté de bien définir l'état normal dans le raisonnement en arrière, et l'impact de la partie discrète sur l'algorithme de la méthode proposée, de plus, la partie d'analyse quantitative n'est pas traitée.

Les inconvénients de cette méthode résident dans la multitude des scénarios possibles conduisant à l'état redouté.

Le choix des RdPDS pour la modélisation de l'aspect discret et continu des systèmes mécatroniques est en bonne adéquation avec la nature hybride de ces systèmes.

Le problème d'explosion combinatoire est évité par le fait d'extraire les scénarios directement à partir d'un modèle RdP du système sans passer par le graphe d'accessibilité et en s'appuyant sur les arbres de preuves en Logique Linéaire qui permettent de gérer les ordres partiels.

Outre, l'inconvénient de cette approche est que du moment qu'elle opère uniquement sur l'aspect discret du modèle, de nombreux scénarios incohérents vis-à-vis de la dynamique continue sont générés. De plus l'ordre d'occurrence des événements n'est pas pris en compte et les scénarios générés ne sont pas minimaux.

Sur la même voie **Malika Medjoudj** [5] a continué le travail de Khalfaoui, ainsi elle a repris l'approche « l'évaluation de la probabilité d'occurrence par une approche basée sur la logique linéaire et les Réseaux de Pétri Prédicats Transitions Différentiels Stochastiques (RdP PTDS); et de plus, elle a élaboré une nouvelle version de l'algorithme qui permet d'éliminer des scénarios incohérents vis-à-vis de la dynamique continue du système. De plus, une automatisation de cet algorithme a été faite, (cette étape a été proposée dans les perspectives de travaux de Mr Khalfaoui ), elle a développé en JAVA un outil ESA\_PetriNet (Extraction & Scenarios Analyser by PetriNet model) qui permet d'extraire les scénarios critiques qui mènent vers l'état redouté à partir d'un

modèle Réseau de Pétri temporel et de vérifier certaines propriétés des systèmes pilotés par calculateurs. Finalement, cet outil est appliqué et testé à un système de contrôle des trains d'atterrissage d'un avion.

- **Discussion :**

L'approche de **Malika Medjoudj** a pris en compte l'aspect continu par des abstractions temporelles lorsque c'est nécessaire, et elle a mieux caractérisé le scénario et ses différentes propriétés comme la minimalité.

Mais certainement, il existe d'autres améliorations pour la minimalité des scénarios construits et forçément des algorithmes.

*III,2) L'estimation de la fiabilité par la modélisation qualitative et quantitative*

L'estimation de la fiabilité doit être menée lors de la conception d'un système mécatronique, celle-ci a été faite par deux approches : approche qualitative et approche quantitative. Cette étude est basée sur l'analyse qualitative composé de deux analyses fonctionnelle et dysfonctionnelle dont la première permet de réaliser une décomposition arborescente du système par les méthodes SADT, SART (qui a l'aspect dynamique qui manque SADT) et de même construire une correspondance de RdP.

L'analyse Dysfonctionnelle est établie par les méthodes AMDEC, AEEL pour les défaillances, ces deux analyses vont construire un RdP. [11],[12].

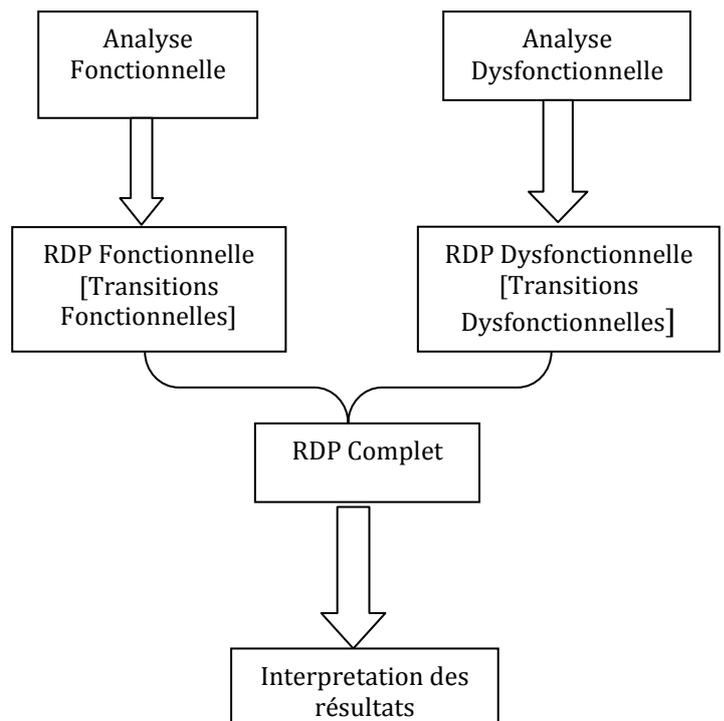


Figure 2 : Méthodologie d'évaluation de la fiabilité mécatronique.

Affectation des lois aux Transitions fonctionnelles :

Pour obtenir Les temps associés aux transitions fonctionnelles, il est nécessaire de représenter le système physique grâce aux équations et aux dérivées partielles en tenant compte des variables aléatoires d'entrée. Ces équations permettent ainsi de simuler l'évolution des variables continues de la partie énergétique du système

Affectation des lois aux Transitions dysfonctionnelles :

On associe très souvent des lois de distribution aux transitions dysfonctionnelles suivant les connaissances acquises sur tel ou tel composant :

- pour les composants électroniques loi exponentielle,
- pour les logiciels : modèle de Jelinski-Moranda, etc.
- Pour les composants mécaniques la méthode mécano-fiabiliste PHI2 pour estimer la probabilité de défaillance en fonction du temps  $P_f(t)$

### Discussion

La contribution du A.DEMRI est née de la nécessité de séparer les études de la sécurité des systèmes mécatroniques en deux parties : analyse qualitative suivie d'une analyse quantitative. Cette approche a été établie par [Moncelet 98]. Le principal obstacle de l'analyse qualitative est l'explosion combinatoire du nombre d'états du graphe, et l'analyse quantitative souffre des temps de simulation prohibitifs dus à la prise en compte par discrétisation de la partie continue.

### III,3) L'estimation de la fiabilité par la modélisation qualitative et quantitative avec le retour d'expérience :

Alin Gabriel [6] a proposé pour l'estimation de la fiabilité prévisionnelle la Méthode Réseaux de Perti Stochastique Déterminé qui est basée également sur une modélisation fonctionnelle (permettant de donner les temps de fonctionnement) ; une modélisation dysfonctionnelle (donnant les instants de défaillance). La méthode a été appliquée sur le système mécatronique de l'ABS. En spécifiant qu'il fallait avoir des recueils des données pour chaque composant.

Les recueils d'expérience « REX » ou les données de fiabilité sont disponibles et nombreuses ; En pratique, on utilise souvent des bases de données connues ou, mieux encore, quand cela est possible, les données issues de retours d'expériences auprès des fabricants des composants ce recueils sont aussi établies dans les travaux de H.Belhadaoui, [7],[8].

Et à partir de banques de données de fiabilité de composants on peut modéliser l'architecture du système, et éventuellement la simulation de son fonctionnement. Cette méthode donne de bons résultats dans le domaine de l'électronique mais de plus

mauvais résultats dans le domaine de la mécanique, d'autant que certains composants ne figurent pas dans les recueils de données disponibles.

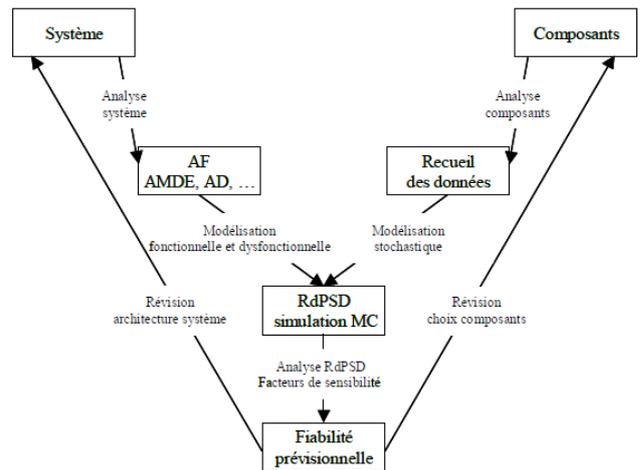


Figure 3 : Méthodologie d'évaluation de la fiabilité mécatronique

Les tableaux suivants représentent un exemple des références indexés de recueil d'expérience pour les composantes électroniques.

Source	Titre	Editeur
FIDES	Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques.	DGA-DM/STTC/CO/477
IEEE STD	IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic Sensing Component and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear Power Generating Stations.	Institution of Electrical and Electronic Engineers, New York, USA.
MIL-HDBK-217	Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment.	United States Department of Defense.
BT-HRD	Handbook for Reliability Data.	British Telecommunications.
EPRD	Electronic Parts Reliability Data.	Reliability Analysis Center, RAC, New York, USA.
GJB	Chinese Military Standard.	Beijing Yuntong Forever Sci-Tech.
RDF(CNET)	Recueil de données de fiabilité.	Centre National d'Etudes des Télécommunications UTE, Paris, France.
Telecordia Bellcore	Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment.	Telecordia Technologies, New Jersey, USA.

Tab1 : Recueil de donnée de fiabilité en électronique [7]

### Discussion :

Cette méthodologie développée permet de :

- modéliser et simuler les comportements fonctionnels et dysfonctionnels des systèmes
- estimer la fiabilité (estimateur ponctuel et intervalle de confiance) par simulation ;
- réaliser des études de sensibilité afin de connaître la contribution de chaque composant à la fiabilité du système ..

III,3) L'estimation de la fiabilité par la prise en compte les interactions multi domaine

Les travaux précédents ont néanmoins ignoré les autres caractères des systèmes mécatroniques, tels que reconfigurable, hybride et interactif qui sont des caractères essentiels et nécessaires à l'évaluation de la fiabilité des ces systèmes. à ce stade, [N.Hammouda] a introduit la notion de l'analyse organique, qui permet de définir l'architecture du système avec l'ensemble des organes et composants et de leurs interfaces pour répondre aux fonctions techniques attendues. Les principales étapes pour la construction de l'architecture organique sont :

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

La méthode proposée est comme la suite [13][14] :

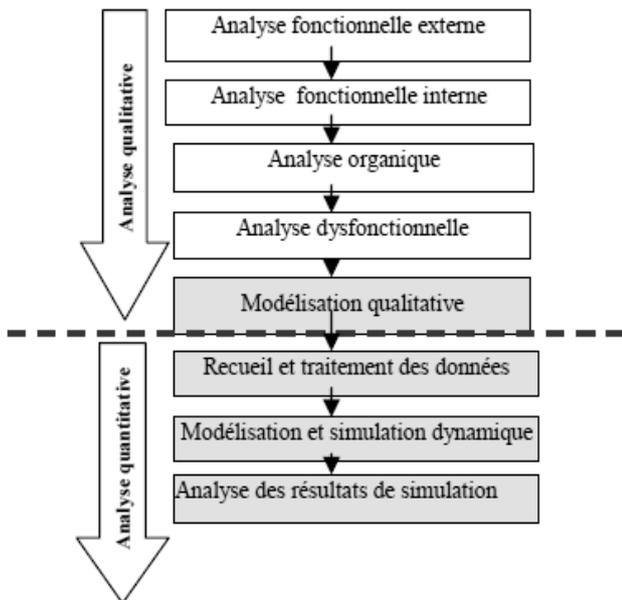


Figure 4 : Démarche d'estimation de la fiabilité mécatronique.

A ce point là, les deux aspects Hybrides dynamiques, sont bien abordés. Alors Pour l'aspect Interactif N. HAMMOUDA, G. HABCHI [14], ont ajouté L'analyse organique analyse fonctionnelle, puis ils ont injecté sur Le

RDP déjà faite pour un système (Dynamique Hybride) des nouvelles transitions qui représentent les interactions entre les domaines.

Comme application de cette proposition ils ont choisi l'interaction Bobine / palier comme interaction entre les domaines électrique bobine.

La figure suivante représente le modèle dysfonctionnel avec la prise en compte l'interaction bobine / palier :

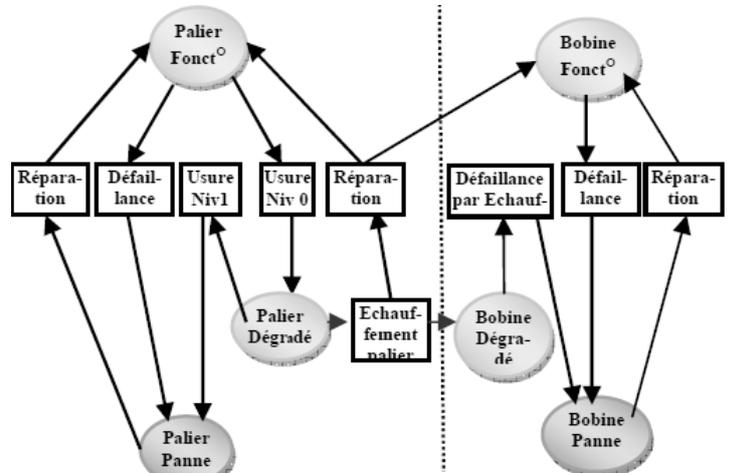


Figure 4 : modèle dysfonctionnel de la fiabilité mécatronique. [14]

Cette proposition a été efficace en terme d'estimation, mais la discussion reste ouverte a propos de la méthode avec la quelle ils ont identifié cette interaction ? et de même ca ouvre pour autre étude d'autres types de stress généré comme la Vibration !! par exemple etc..

Autrement comment peut on identifier tous les interactions multi domaines d'un système ?

III,4) Choix d'outils de modélisation :

Pour bien estimer et évaluer la fiabilité, en revenant sur plusieurs méthodes de modélisation des systèmes mécatroniques, nous pouvons citer : les RdP (Réseaux de Petri) , les chaines de Markov , les réseaux bayésiens dynamiques (RBD), les réseaux de neurones , etc.

Les méthodes les plus adaptées à la modélisation et à l'analyse des systèmes mécatroniques sont les modèles à états-transitions tels que les graphes d'états (les graphes de Markov, les réseaux bayésiens) et les approches basées sur les réseaux de Petri.

Les méthodes statistiques ne sont pas applicables aux systèmes mécatroniques [KHALFAOUI, 2003] : si l'on considère par exemple la méthode des arbres de défaillance, elle ne permet pas de distinguer 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, donc on ne peut pas représenter les reconfigurations. Enfin, il n'est pas possible de prendre en compte les défaillances temporaires.

Le fonctionnement des systèmes mécatroniques est régi par deux phénomènes : la variation continue et déterministe des paramètres énergétiques, mais aussi par les sollicitations et défaillances des composants du système. Ces deux phénomènes sont en interaction et leur interaction influe sur la fiabilité, c'est pour cela les méthodes qui n'ont un aspect probabiliste sont incapables de prendre en compte de manière satisfaisante la dynamique des variables continues correspondant aux paramètres énergétiques.

**-Réseau de Pétri RDP :**

Le fait de modéliser avec des réseaux de Pétri et de générer par la suite le graphe de Markov facilite beaucoup la modélisation car elle est plus structurée et plus compacte. Cette approche pose un problème si l'on veut décrire un comportement complexe en dehors de la présence de défaillances. D'après [A.DEMRI] Les raisons qui alimentent le choix de des réseaux de Pétri sont :

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

L'un des atouts indéniables des réseaux de Petri, par rapport aux autres formalismes comme les statecharts, est qu'ils reposent sur des fondements théoriques permettant de vérifier les propriétés générales d'un modèle (vérifier que le modèle est réinitialisable, vivant, sans blocage, borné, etc.) ainsi que l'accessibilité de certains marquages. Les méthodes de recherche de propriétés dans les réseaux de Petri sont basées non seulement sur l'élaboration du graphe des marquages accessibles comme c'est le cas pour les automates, mais aussi sur l'algèbre linéaire (calcul des invariants de places et de transitions), la réduction des réseaux ainsi que sur la logique Linéaire. Cette dernière permet de donner une condition nécessaire et suffisante de l'accessibilité entre deux marquages et de caractériser de manière élégante et efficace les relations d'ordre partiel [SARHAN K.]

**-Automate Stochastique Hybrides**

La modélisation par ASH permet d'accéder à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement d'un système complexe tel que celui du cas-test considéré. Outre l'accès aux probabilités des états dangereux, elle permet d'analyser exhaustivement l'ensemble des séquences qui y mènent et leurs probabilités respectives.

**Simulation de RDP :**

L'interprétation des résultats s'effectue par la simulation de ce RDP par un logiciel, à titre d'exemple :

- AltaRica
- Miss RDP
- Simulink/State flow Matlab
- SURF 2
- STATECHART
- SIMFIA
- OCAS

**Exemple : [15]**

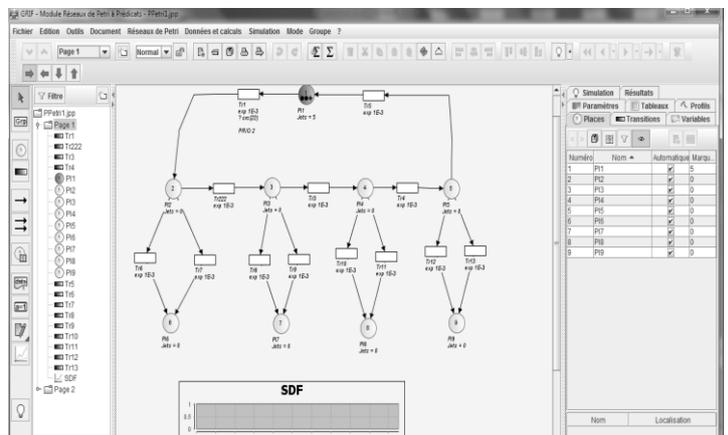


Figure 3 : RDP du système Photovoltaïque sous le simulateur GRIF.

Théoriquement, Pour un RDP, L'interprétation des résultats se fait par un calcul présenté comme suit:

- la matrice d'incidence C
- la matrice d'incidence W
- Elaboration du graphe de marquage du RDP.
- la matrice des taux de transition Q
- Dédire la probabilité d'apparition d'un événement redouté du système étudié

### Simulation par la technique de Monte-Carlo :

La technique de simulation de Monte Carlo reproduit le fonctionnement d'un système réel par une méthode analytique et ensuite analyse les effets des variations des entrées sur les sorties du système [ZWINGMANN, 2005]. Elle comprend six éléments clés :

- définir le problème en termes de variables aléatoires de conception.
- Identifier les caractéristiques probabilistes de toutes les variables aléatoires en termes de fonction de densité de probabilité et des paramètres associés.
- Générer des valeurs pour ces variables aléatoires.
- Evaluer le problème pour chaque ensemble de données.
- Conclure sur la probabilité de défaillance du produit.
- Déterminer la précision de la simulation.

### Comparaison qualitative entre les RDP/ ASH [14]

	Approche RdPS	Approche par ASH
Résultats qualitatifs et quantitatifs obtenus	Partiel Pas de simulation d'histoires en nombre.	Distribution des causes d'Indisponibilité Fortuite Identification et évaluation des séquences menant à l'Indisponibilité Fortuite
Difficultés rencontrées	Représentation de la commande Temps d'exécution Raideur du modèle induite par la représentation des capteurs	Mise en œuvre complexe des outils Temps d'exécution Raideur du modèle induite par la représentation des capteurs
Perspectives	Améliorer modélisation de la commande (problème de synchronisation)	Résolution des aspects optimisation Parallélisation des calculs Améliorations de l'outil Scilab/Scicos : parallélisation, synchronisation
Notes	Modèle global obtenu par composition Relativement aisé à mettre en œuvre Absence de modèle de commandes	Modèle global obtenu par composition d'Automates à Etats Finis (vérification possible) Développements futurs sur Scicos Scilab indispensables

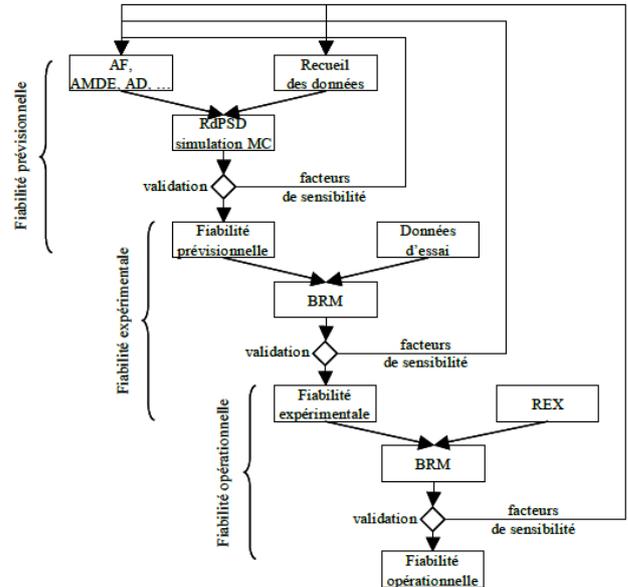
Tableau : Comparaison entre ASH et RDP

### III) Estimation de la fiabilité expérimentale et opérationnelle :

III,1) Estimation L'approche Bayésienne BRM basée sur les données des essais de fiabilité et le retour d'expérience :

L'estimation des paramètres des lois de fiabilité expérimentale et opérationnelle s'appuie sur deux types de données de fiabilité : les données des essais de fiabilité (pour la fiabilité expérimentale) et les données du retour d'expérience (pour la fiabilité opérationnelle). la première est basée sur les résultats d'essais sur les prototypes et la deuxième basée sur le retour

l'expérience. L'application de la méthode BRM, permet d'identifier la distribution a posteriori de tous les paramètres des lois de fiabilité des composants du système, une analyse de sensibilité a été effectuée afin d'évaluer la fiabilité expérimentale et opérationnelle.



Démarche de la fiabilité expérimentale et opérationnelle [6]

Pour tester la fonctionnalité de cette approche, celle-ci a été appliquée au système ABS.

Les réseaux bayésiens, sont des modèles graphiques interprétés à partir de systèmes experts probabilistes pour représenter des relations qualitatives et quantitatives entre plusieurs variables au travers des dépendances et des probabilités conditionnelles. Ils sont encore peu connus et utilisés en fiabilité mais tendent à émerger pour répondre à des problématiques d'optimisation des politiques de maintenance. En particulier, de nombreux travaux sont menés dans l'objectif d'identification à partir de jugements d'experts, des variables agissant sur la dégradation ou la défaillance d'un matériel.

Notons que la Méthode BRM est efficace pour l'estimation de paramètre de loi de fiabilité. Et à cause de cette méthode il a abouti à une amélioration des estimateurs par rapport à celle obtenue par la loi de weibull... ; notons également le besoin de concevoir un outil informatique automatisant les calculs. de même Alin Gabriel a proposé comme perspective d'intégrer le mode stochastique à titre d'une nouvelle approche, et aussi l'interaction entre les différentes technologies.

### Discussion

La méthodologie permet de capitaliser la connaissance sur le produit au cours des différentes phases d'évaluation du produit

(prévisionnelle, expérimentale et opérationnelle) pour affiner les estimations de fiabilité.

*III,2) Les essais accélérés modélisés par une démarche Bayésienne :*

**Sorin Vioculescu** en 2009 a proposé pour les essais accélérés, des modèles SVA paramétrique et semi-paramétrique pour réduire le temps de test les systèmes embarqués, afin d'avoir une estimation de bonne qualité basée sur la démarche Bayésienne, Cette démarche s'appuie sur les lois choisies a priori, pour cela il a proposé de définir des pseudo lois conjuguées, dans le cas d'une incompatibilité des données, une pondération de facteur de compatibilité des formalismes Bayésiens avec les données d'essai a été mise afin de réduire les intervalles de confiance.

Et vu l'existence d'une variabilité d'usage qui dépend de l'environnement d'utilisation de produit, et de niveau de stress pour chaque phase de vie. Alors la méthode contrainte résistance a été convenable pour modéliser l'effet aléatoire du stress qui a été traité par trois manières différentes (Distribution de stress indépendant du temps, séries temporelles et discrétisation du profil.)

Ces études déploient autant des voies de recherche, parmi celles-ci : Comment étendre la démarche bayésienne à d'autres modèles. Comment optimiser les plans d'essais afin de réduire le coût d'essai, et la faisabilité d'utilisation de la méthode  $\Phi 2$  pour l'estimation de la fiabilité en environnement aléatoire....dans la même voie de recherche y'a eu des essais accélérés mise en place sur des systèmes photovoltaïques par **Remi LARONDE** d'où il a proposé une méthodologie qui respecte la norme CEI 61730. La simulation de dégradation des modules photovoltaïques est faite à partir d'un outil développé nommé PVMODREL et des données d'essais accélérées en considérant des conditions nominales stochastiques. Pour observer l'influence des données d'entrée sur la durée de vie et la fiabilité d'un module photovoltaïque, Une étude de sensibilité des différents facteurs est effectuée. Sa méthodologie est détaillée comme suit :

- Analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle.
- Choix des essais accélérés
- Choix des lois d'accélération et du nombre d'essais
- Détermination des niveaux de sévèrisation
- Détermination du temps d'essais.
- Mode expérimentale
- Détermination des paramètres de durée de vie
- Détermination des paramètres de la loi d'accélération
- Simulation des conditions nominales stochastiques
- Estimation de la fiabilité

De plus, à partir des réseaux de Pétri stochastiques, il a établi une modélisation dysfonctionnelle de ce système photovoltaïque, par laquelle il a estimé la fiabilité en se basant aussi sur le retour d'expérience, avec présentation de ce système comme un ensemble des composantes série-parallèle, d'où vient les résultats finaux, le calcul de sensibilité, quant à lui, a été effectué de la même manière que celle faite avec l'outil PVMODREL la simulation par le réseau de Pétri faite dans le logiciel MOCA-RP.

#### **Discussion :**

Pour l'approche du Remi larond, son travail laisse la voie ouverte pour étudier les autres modes de défaillances, et aussi de se focaliser sur la pertinence des données « retour d'expérience » des systèmes photovoltaïques.

La fiabilité des systèmes mécatroniques dépend de différentes conditions opérationnelles, notons ici « la température, humidité, ... ». Et aussi l'influence de type des applications, le niveau des charges et la capacité lors du fonctionnement.

#### **IV) Discussion et synthèse :**

En gros modo, les démarches proposées pour l'estimation la fiabilité prévisionnelle maîtrisent les aspects Dynamique Hybride d'un système mécatronique, cette modélisation de ces deux aspects que ce soit par RDP ou bien ASH, restent discutables selon les caractéristiques du système à étudier, car y'en a plusieurs facteurs à prendre en compte pour ce choix [15], bien évidemment il faut refaire un état d'art le choix de modèle.

D'une part, Extraction des scénarios critiques à partir d'un modèle RdP, surtout le choix des RdPDS est en bonne adéquation avec la nature hybride de ces systèmes, mais l'inconvénient toujours c'est le grand nombre des scénarios redoutés générés, en plus des autres scénarios incohérents vis-à-vis de la dynamique continue. Mais on peut dire que cet inconvénient est plus ou moins résolu avec l'algorithme optimisé proposé par Malika M. qui a de même s'est basée sur logique linéaire et les Réseaux de Pétri Prédicats Transitions Différentiels Stochastiques (RdP PTDS).

D'autre part, la majorité des travaux de A. Demri Amel DEMRI, Alin Gabriel Mihalache, N.Hammouda se basent sur l'approche Qualitative compris l'analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle, La modélisation par RDP représente mode comportementale du système, dont lequel il est nécessaire d'associer des temps aux différentes transitions de ce réseau. et associer une loi de probabilité de défaillance pour les transitions dysfonctionnels. Et une approche quantitative basée la méthode de diagramme de fiabilité.

Le fait d'introduire le recueil d'expérience comme étant des paramètres de base concrétise l'estimation, des systèmes mécatroniques qu'on doit se focaliser notamment sur la

pertinence de ses données. Et le fait d'intégrer le facteur de sensibilité permet d'observer l'influence des données d'entrée sur la fiabilité et de même juger l'influence des variables des différents modèles.

Pour l'aspect interactif et reconfigurable, et d'après notre connaissance jusqu'à maintenant, peu des études que traite la fiabilité mécatronique avec la prise en compte de ces deux aspects, N. Hammouda outre qui ont ajouté l'analyse organique pour l'analyse fonctionnelle, il a introduit aussi une nouvelle proposition d'intégration des nouvelles transitions sur le modèle dysfonctionnel de RDP, et par la suite de refaire le calcul de la fiabilité de système. Cette approche a donné des résultats pertinents, mais de notre part on ne voit pas sur quelles bases scientifiques l'identification de ces interactions.

Vu la complexité du système due aux intégrations des différentes technologies, (mécaniques, électrique,...) on peut aussi travailler sur d'autres facteurs que la Température,

- Climatique : humidité .
- Électriques : Cycles ON-OFF, surtension, intensité de courant, etc.
- Mécaniques : Torsion/flexion, chocs mécaniques, vibrations, etc.

Autres, spécifiques aux produits : par exemple pour des produits électroniques On trouve, décharges électrostatiques, champs magnétiques/électriques, rayonnement, etc.

Ces interactions sont classés en deux types [15], des interactions physiques (pressurisation, chauffage, échange de chaleur..), et interactions Logiciel/ matériel, Ces interactions sont dues à la présence de réseaux de communication, de traitements de type multitâche, multiplexage au sein de la commande. Alors de notre sens, on voit que c'est intéressant de traiter ce deuxième d'interaction pour un système mécatronique.

Et concernant l'aspect reconfigurable, on peut dire que l'estimation de la fiabilité des systèmes reconfigurable es une voie de recherche dans sa naissance, on a effectué pas mal de recherche, et malheureusement on n'a pas trouvé des études dédiés a ce thème, surtout pour un système mécatronique reconfigurable.

La fiabilité dépend de différentes conditions opérationnelles, notons ici « la température, humidité, ... » ainsi que l'influence de type des applications, le niveau des charges et la capacité lors du fonctionnement. Y'on a d'autres travaux qui ont suivi le modèle de Cox's régression pour le calcul de la probabilité de défaillance « Sebastian Bobrowski ». Lors de la Réalisation des essais à vitesse accélérée sur les systèmes mécatroniques.

## V) Conclusion et perspectives :

Dans cet article nous avons cité quelques méthodes et approches d'évaluation de la sureté de fonctionnement, celles-ci ont abouti à des résultats permettant de mieux cerner les aspects hybrides, dynamiques, interactifs et reconfigurables, des systèmes mécatroniques. Cependant, nous avons remarqué l'insuffisance des résultats pour certains aspects, ce qui laisse la voie ouverte pour une prolongation éventuelle de notre recherche. En conclusion de ce travail, nous tenons à préciser qu'à travers les études présentées :

- L'estimation de la fiabilité des systèmes est un outil précieux qui aide à mieux définir une stratégie de Maintenance.
- La conception des systèmes mécatroniques comportant une intégration poussée de technologies différentes, nécessite dès le début de l'étude l'intégration des quarts domaines (Mécanique, électrique, logiciel, automatique) et résulte d'une complexité du processus, qui influe sur la fiabilité dès lors de la conception de ce système.

## References:

- [1] Thèses Khalfaoui : Méthode de recherche des scénarios redoutés pour l'évaluation de sureté de fonctionnement des systemes mécatroniques du monde automobile. 2003
- [2] [Khalifaoui 00] Sarhane Khalfaoui, "Modélisation et validation par simulation des systèmes hybrides", rapport de DEA, INP-ENSEEIH, septembre 2000.
- [3] [Khalifaoui 01b] S. Khalfaoui, E. Guilhem, H. Demmou, N. Rivières, "Extraction de scénarios critiques à partir d'un modèle RdP à l'aide de la logique Linéaire", MSR'2001 Modélisation des systèmes réactifs, 17-19 Octobre 2001, Toulouse, France p. 409-424. Rapport LAAS No01126.
- [4] [Khalifaoui 02b] S. Khalfaoui, E. Guilhem, H. Demmou, R. Valette, "Une méthode pour obtenir des scénarios critiques dans les systèmes mécatroniques", Colloque Européen de Sécurité de Fonctionnement (Im13), Palais des Congrès - Lyon - France - 18 au 21 Mars 2002. Rapport LAAS No01614.
- [5] [Malika MEDJOUJJI 2006] Thèse de doctorat Contribution à l'analyse des systèmes pilotés par calculateurs : Extraction de scénarios redoutés et vérification de contraintes temporelles.
- [6] [Alin Gabriel MIHALACHE 2007] Thèse doctorale : Modélisation et évaluation de la fiabilité des systemes mécatroniques : Application sur système embarqué.
- [7] [Belhadaoui et al., 2006] H.Belhadaoui, O.Malasse, H.Medromi. 'Développement d'un outil logiciel pour l'évaluation du Niveau de sécurité de fonctionnement de contrôle Relatif a la sécurité. (Calcul des paramètre de sûreté de Fonctionnement des systèmes de commande.)'. MOSIM Syrie, 2006
- [8] [Belhadaoui et al., 2007-a] H.Belhadaoui, C.Cassier, O.Malassé, J.F. Aubry, 'Outil d'aide à la conception des systèmes mécatroniques'. Qualita-Tanger Maroc, Mars 2007.
- [9] [Belhadaoui et al., 2009] H.BELHADAUOI, G. BUCHHEIT, O.MALASSE, J-F.AUBRY, H.MEDROMI. 'Méthode quantitative d'Evaluation de la Fiabilité des Systèmes Critiques Programmés' Landa\_Mu16, Avignon, Septembre 2009.
- [10] [HICHAM BELHADAUOI.2011] Thèse doctorale Conception sûre des systèmes mécatroniques intelligents pour des applications critiques.
- [11] [Amel Demri Grenoble, 27-31 août 2007 ]Fiabilisation d'un système mécatronique dès la phase de conception.
- [12] [Amel Demri 2009. Thèse doctorale ] ; Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle ; thèse de doctorat, Université d'Angers,
- [13] [N. HAMMOUDA 2013 ] ; Mise en œuvre d'une méthodologie d'évaluation de la fiabilité pour les systèmes mécatroniques.
- [14] Rapport final du projet APPRODYN : APPROches de la fiabilité DYNamique pour mod\_eliser des systemes critiques Jean-Fran\_cois Aubry, Genia Babykina, Anne Barros, Nicolae Brinzei, Gilles Deleuze, Benote De Saporta, Fran\_cois Dufour, Yves Langeron, Huilong Zhang
- [15] Remi Larond, Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédiée aux énergies renouvelables Application a un système photovoltaïque.
- [16] N.Hammouda, FIABILITE DES SYSTEMES MECATRONIQUES EN UTILISANT LA MODELISATION ET LASIMULATION
- [17] Thesame. La mécatronique à l'épreuve du marché. Jitec, 2003