

# L'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques avec la prise en compte des interactions multi-domaines

## Taking account of Multi-domains interactions in predictive reliability assessment of mechatronic systems

Nabil B. Amrani<sup>1</sup>, L. Saintis<sup>2</sup>, D. Sarsri<sup>3</sup>, M. Barreau<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup> Laboratoire LARIS, ISTIA, université d'Angers, laurent.saintis@univ-angers.fr, mihaela.barreau@univ-angers.fr

<sup>1,3</sup> Laboratoire LTI, Ecole nationale des sciences appliquées, Tanger, Maroc, nabil.bensaïd.amrani@etud.univ-angers.fr, dsarsri@ensat.ac.ma

**RÉSUMÉ.** Les systèmes mécatroniques sont à la fois hybrides, dynamiques, interactifs et reconfigurables, ce qui entraîne des difficultés dans la modélisation dysfonctionnelle. Les potentielles interactions multi-physiques entre les composants peuvent avoir des impacts sur les dégradations ou sur les dysfonctionnements du système. Tous ces éléments à prendre en compte rendent incertain le modèle d'évaluation de la fiabilité. Le travail de recherche présenté dans cet article a pour but d'améliorer la prise en compte des interactions multi-domaines dans l'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques. A partir d'un état de l'art des méthodes d'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques, nous proposons des améliorations permettant une prise en compte quantitative des interactions par l'intégration de facteurs d'influence représentant des interactions multi domaines. Cette intégration est effectuée de manière générale à partir d'un modèle à hasards proportionnels et, dans le cas d'une interaction avec pour facteur de stress la température, en utilisant la loi d'Arrhenius.

**ABSTRACT.** The mechatronic systems are hybrid, dynamic, interactive and reconfigurable. Therefore their dysfunctional modeling is very difficult. Multi-physical interactions between components have impacts on the degradation or on system failures, leading thus to more uncertainty in reliability evaluation. The work presented in this paper aims to improve the integration of multi-domain interactions in the reliability assessment of mechatronic systems.

After a presentation of the state of the art of mechatronic systems reliability estimation methods, we propose to represent multi domain interactions by influential factors in the dysfunctional model.

We generally use proportional hazard models ; in the case of an interaction represented by a temperature stress, Arrhenius model is used.

**MOTS-CLÉS.** Fiabilité, Modélisation fonctionnelle, Modélisation dysfonctionnelle, RdP (Réseaux de Pétri), Interactions multi-domaines, facteur d'influence, modèle de Cox, loi d'Arrhenius.

**KEYWORDS.** Reliability, Functional Modelling, Dysfunctional Modelling, Petri nets, Multi-domain Interactions, Influence Factor, Cox Model, Arrhenius Law.

### 1. Introduction

L'estimation de la fiabilité des systèmes mécatroniques reste toujours un verrou scientifique pour les industriels, une voie de recherche ouverte. La complexité des systèmes mécatroniques est un défi majeur pour les études de fiabilité prévisionnelle. L'évaluation de celle-ci permet de prendre des orientations optimales en matière de conception dès le début d'un projet. Elle consiste à prévoir la fiabilité d'un produit à travers des analyses qualitatives fonctionnelles (FAST, SADT ...) et dysfonctionnelles telles que l'AMDEC. Par la suite, une modélisation quantitative doit être établie par un outil fiable tel que les réseaux de Pétri (RDP) ou les réseaux Bayésiens, en intégrant les données des différents recueils de données pour chaque composant du système.

Les systèmes mécatroniques sont caractérisés par des aspects hybrides, dynamiques, interactifs et reconfigurables. Un tour d'horizon des travaux sur la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques montre que les aspects dynamiques et hybrides sont bien traités [DEM 09], [MIH 07], [AMR 16] et [BAR 04] notamment à travers de multiples modèles : réseaux de Pétri, réseaux Bayésiens et automates stochastiques hybrides. Par contre, la prise en compte des interactions multi-domaines reste un verrou scientifique pour les fiabilistes.

Notre contribution se focalise essentiellement sur cet aspect interactif des systèmes mécatroniques, en formalisant une nouvelle méthodologie bien adaptée à cet aspect, ce qui nous permet de réévaluer la fiabilité prévisionnelle tout en prenant en considération les interactions multi-domaines des systèmes mécatronique lors de leurs dysfonctionnements.

Dans le domaine industriel, ces interactions peuvent être classifiées en plusieurs catégories : fonctionnelles, dysfonctionnelles, physiques, pluridisciplinaire et en interaction entre le contrôle-commande et la physique. D'après [HAM 14], le caractère interactif d'un système est défini par l'existence d'interactions physiques et/ou fonctionnelles entre les composants du système.

Dans la suite de notre travail, lors d'évaluation de la fiabilité des systèmes en mécatronique, on définit l'interaction multi domaine comme étant l'influence de la dégradation ou de la défaillance d'un composant d'un domaine (électrique, électronique...) sur un autre composant d'un domaine différent (ex : mécanique) et sur la défaillance de ce dernier. Il s'agit donc d'une relation mutuelle cause/effet de dysfonctionnement, entre divers domaines (mécanique, électronique, logiciel...) dans le même système mécatronique.

## 2. Méthodologie proposée

A notre connaissance, il n'existe pas de méthodologie globale qui permette l'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques en tenant compte de l'aspect interactif de ces systèmes, à l'exception de la proposition de N.Hammouda [HAM 14], basée sur l'intégration de l'analyse organique dans les approches classiques présentées (modélisation qualitative et quantitative). Aussi, afin d'évaluer la fiabilité dès la conception (générale ou détaillée), nous proposons une méthodologie décrite par les étapes suivantes :

- modélisation qualitative :
  - analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle (AMDEC) ;
  - retour d'expérience ;
- modélisation des Interactions ;
- identification des interactions comme des lois d'accélération associées aux stress (facteurs d'influence) ;
- modélisation quantitative et Interprétation et Résultats.

Pour une interaction multi domaine, un composant défaillant influence un autre composant de nature différente, et l'interaction va influencer directement les valeurs de taux de défaillance du deuxième composant. A ce moment-là, il faut recalculer les taux de défaillance pour les composants influencés par ces interactions. Ce calcul doit être fait à partir des lois d'accélération associées aux stress, en fonction de la variation de la valeur du stress.

Une interaction multi-domaine peut être définie comme une fonction d'influence, entre deux composants de domaines différents, et lorsque le phénomène de dégradation menant à la défaillance est connu, on peut utiliser une loi d'accélération associée à la physique de la défaillance. Par exemple, dans le cas où l'interaction multi-domaine est représentée par un facteur de stress de température, la loi d'Arrhenius peut être utilisée.

## 3. Application sur un système mécatronique

Retenant le cas d'application cité dans [CHO 14], l'interaction étudiée est celle entre le palier et la bobine dans le système d'actionneur intelligent « Voice Coil ».

### 3.1. Présentation de système

Ce système mécatronique est destiné à la réalisation de la fonction de déchargement de wagonnets. Le doigt de l'actionneur se met en obstacle pour ouvrir le volet et libérer le chargement du wagonnet sans arrêt.

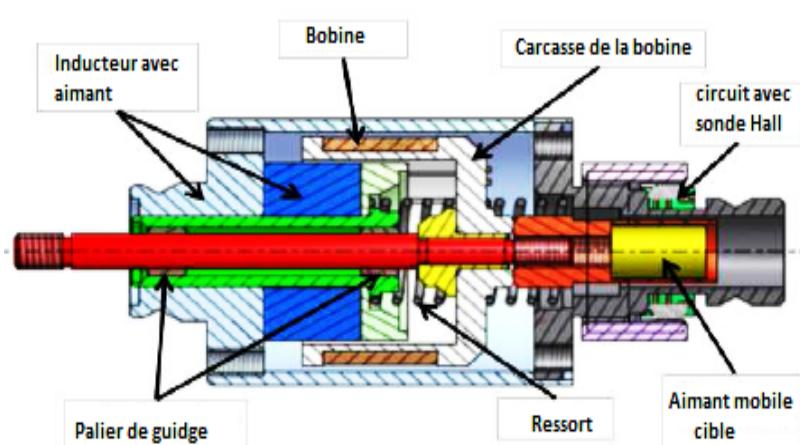


Figure 1. Système actionneur intelligent

Composant	Taux de défaillance
Carte de commande	1.72E-07 h <sup>-1</sup>
Carte de conditionnement	1.16E-06 h <sup>-1</sup>
Bobine	5.10E-05 h <sup>-1</sup>
Inducteur	5.10E-05 h <sup>-1</sup>
Palier de guidage	MTTF = 1.31E+04 h
Beta	= 1.5
Sonde à effet Hall	1.21E-07 h <sup>-1</sup>

Tableau 1. Taux de défaillance des composants

Notre étude est focalisée sur la phase « Chaud », durant laquelle l'influence de l'interaction Palier / Bobine apparaît. Nous nous basons sur le recueil d'expérience cité dans [CHO 14] en exprimant ces taux de défaillance en heures-1 (tableau 1).

### 3.2. Modélisation de la fiabilité avec la prise en compte des interactions

#### 3.2.1. Modélisation Quantitative par RDP

L'évaluation de la fiabilité de notre système a été réalisée à partir d'une modélisation du système par un réseau de Pétri. En ne prenant en compte que les parties dysfonctionnelles, afin d'appliquer la méthodologie avec prise en compte des interactions dans un deuxième temps, ce qui n'est pas possible avec les blocs diagrammes de fiabilité. Cette modélisation est faite à l'aide des réseaux de pétri stochastiques et déterministes (RdPSD) à partir de l'outil Pétri Net V12 de la suite logicielle GRIF et est présentée ci-dessous :

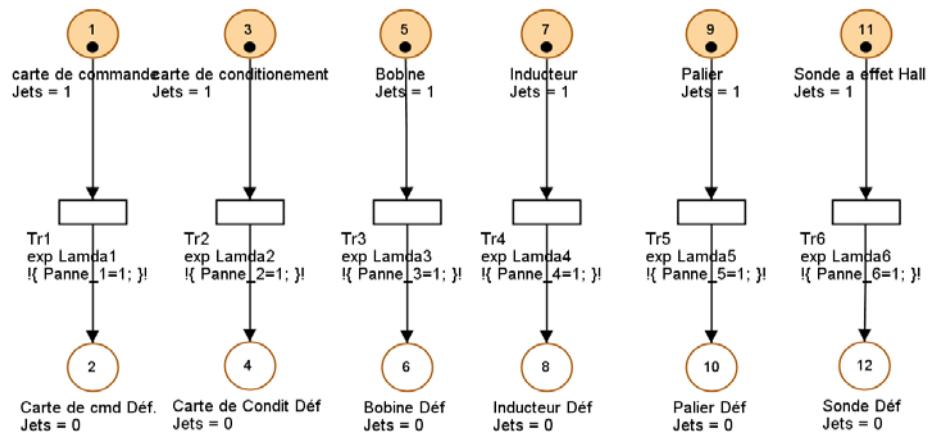


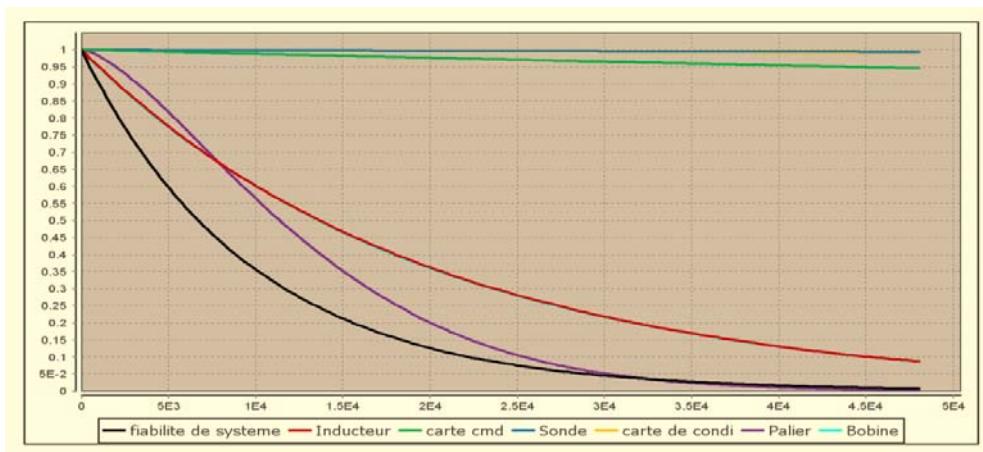
Figure 2. Modélisation RDP à partir de l'outil Pétri Net V12 sans la prise en compte des interactions

### 3.3. Résultats d'évaluation de la fiabilité sans la prise en compte des interactions

En phase de fonctionnement au profil « Chaud », les courbes de fiabilité du système Actionneur, ainsi que celle des différents composants (la carte de commande et de diagnostic de l'actionneur, la carte de conditionnement de la sonde à effet Hall, la sonde à effet Hall, la bobine, l'inducteur avec

aimant et le palier de guidage) sont représentées sur la figure 4. La durée de fonctionnement considérée est de 50000 heures (presque 4 ans) et le facteur d'influence qui représente l'interaction palier/ bobine choisie pour notre étude n'est pas pris en compte.

Nous constatons sur ce graphe que la fiabilité de la bobine et des cartes électroniques est la plus importante ; en revanche le palier et l'inducteur ont une forte diminution dès la première année. De plus, la courbe de fiabilité du système tend vers  $R(t) \approx 0,1$  à partir de 22000 heures (2,5 ans) de fonctionnement.



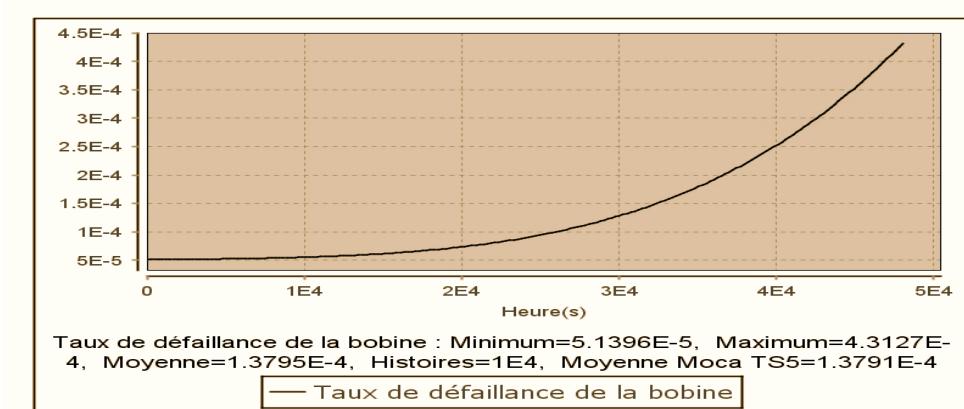
**Figure 3.** Courbe de fiabilité de système et ses composantes

### 3.4. Modélisation de l'interaction pallier/bobine

Dans ce cas d'étude, l'interaction est liée à un seul facteur d'influence, la température. Sans données de retour d'expérience, l'application du modèle de Cox est inappropriée. Dans le cas de la bobine, le phénomène de dégradation se traduit par une loi d'accélération associée à la température, la loi d'Arrhenius le détail de cette modélisation a été présentée en [CHO 14].

La température varie de 20°C à 120°C en phase « Chaud ». Comme facteur d'influence, l'augmentation de la température au niveau de la bobine va accélérer la défaillance et modifier le taux de défaillance. L'évolution de ce dernier doit être fonction de la température selon la loi d'Arrhenius.

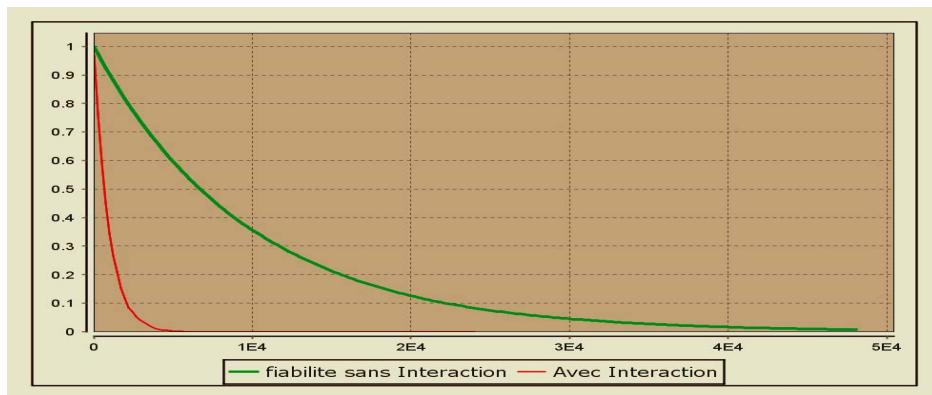
La variation du taux de défaillance est représentée dans la figure 4 :



**Figure 4.** Graph de l'évolution de la température de la bobine

Le graph de la figure 4 représente la variation du taux de défaillance de la bobine d'une manière proportionnelle avec celle de la température. Cette variation commence de la valeur référence ( $5,1.10^{-5}/h$ )

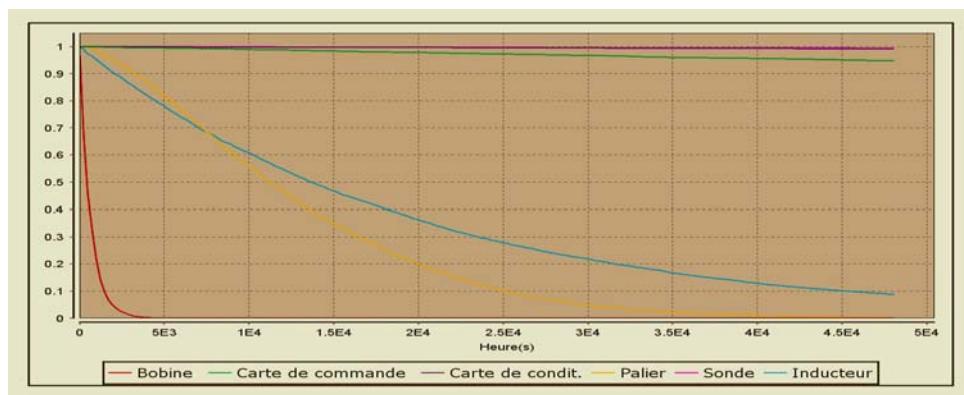
et arrive à  $4,3 \cdot 10^{-4}/\text{h}$  au bout de  $t = 50000\text{h}$ , ce qui montre une augmentation d'un facteur 10 du taux de défaillance de la bobine. La figure 5 représente les courbes de fiabilité avec et sans prise en compte des interactions multi-domaines :



**Figure 5.** Courbe de fiabilité de système avec la prise en compte des interactions

D'après la figure 5, on constate que la fiabilité de la première courbe représentant l'évaluation de la fiabilité sans prise en compte de l'interaction est plus élevée ( $R(t) \approx 0$  au-delà de 4 ans), alors que celle de la deuxième courbe (fiabilité avec prise en compte des interactions), décroît rapidement ( $R(t) \approx 0$  à partir de 5980 heures ( $\approx 8$  mois)). Cette différence représente l'influence de l'interaction Palier/Bobine.

Lors de cette modélisation, la contribution des facteurs d'influence est remarquée en premier lieu au niveau de la bobine, qui est l'élément concerné par cette interaction. Pour les autres composants, la fiabilité est la même, la figure ci-dessus montre les courbes de fiabilité des six composants :



**Figure 6.** Courbe de fiabilité des composantes de système avec la prise en compte des interactions

La courbe présentée en figure 8 montre que la diminution de la fiabilité du système est due à la diminution de la fiabilité de la bobine déterminée par l'interaction Palier/Bobine, qui représente l'élément le plus critique en comparant aux autres composants.

## 4. Résultats

Nous avons pris en compte l'interaction multi-domaine entre palier et bobine en la modélisant par la loi d'Arrhenius. Cette interaction a une influence importante sur la fiabilité du système, influence qui peut être observée dans les résultats obtenus pour la fiabilité système dans les deux cas : avec et sans prise en compte de l'interaction palier/bobine. Dans le premier cas, la fiabilité du système tend vers 0,1 au bout de 2,5 ans de fonctionnement, alors que dans le second cas, la fiabilité du système tend vers 0 au bout de 8 mois de fonctionnement. Cette différence d'environ 26% illustre l'impact de l'interaction sur le fonctionnement du système.

Les résultats obtenus dans [CHO 14] sont différents de ceux obtenus avec la méthodologie que nous proposons. Dans le cas avec la prise en compte de l'interaction palier/bobine, la fiabilité tend vers 0 au bout d'1 an de fonctionnement dans [CHO 14], alors que dans notre exemple la fiabilité système tend vers 0 au bout d'environ 8 mois de fonctionnement. La différence est expliquée par le fait que notre méthodologie prend en compte la variation du stress généré, donc un taux de défaillance variable.

## 5. Conclusion et Perspectives

Dans cet article, nous avons présenté une démarche pour l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle d'un système mécatronique avec la prise en compte des interactions multi-domaine. Cette méthodologie est basée sur la représentation des interactions par des facteurs d'influence et sur l'étude de l'impact de chaque composant sur la fiabilité du système.

La démarche proposée est intéressante dans le cas d'une ou de plusieurs interactions, le modèle de Cox permettant de traiter plusieurs facteurs d'influence, alors la méthodologie devra être appliquée par la suite à des systèmes mécatroniques en prenant en compte plusieurs interactions multi-domaines.

En continuant à améliorer l'étude des interactions, ces voies nous semblent intéressantes pour les futurs travaux :

- Une modélisation de la distance entre les composants de nature différente, comme étant un facteur géométrique modélisé par la distance de Hausdorff.
- L'Utilisation combinée des modèles de réseaux de Pétri et de Bond graph pour l'évaluation de la fiabilité mécatronique.
- La prise en compte des incertitudes épistémiques et aléatoires en relation avec l'impact des interactions multi-domaines sur la fiabilité.

## La bibliographie

[DEM 09] DEMRI A., « Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle, Phd Thesis, Université d'Angers, 2009.

[MIH 07] MIHALACHE A.G., « modélisation et l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique : Application sur un système embarqué », Phd Thesis, Université d'Angers, 2007.

[BAR 04] BARREAU M., TODOSKOFF A., MIHALACHE A., GUERIN F., DUMON B., Dependability Assessment for mechatronic systems : electronic stability program (ESP) Analysis. IFAC AVCS INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN VEHICLE CONTROL AND SAFETY, GÈNES, ITALIA, 2004.

[AMR 16] AMRANI N.B., SAINTIS L., SARSRI D., BARREAU M., Evaluating the predicted reliability of mechatronic systems : state of the art, Mechanical Engineering : An International Journal, vol. 3, no. 2, May 2016.

[HAM 14] HAMMOUDA N., HABCHI G., BARTHOD C., LOTTIN J., DUVERGER O., « Implementation of a methodology for evaluation of the reliability of mechatronic systems », in 2014 10th France-Japan/ 8th Europe-Asia Congress on Mecatronics (MECATRONICS), 2014, p. 41-46.

[CHO 14] CHOUKET N., HABCHI G., BARTHOD C., DUVERGER O., « Fiabilite des systemes mecatroniques en utilisant la modelisation et la simulation », in MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nancy, France, 2014.

[AMR 16] Ben Said AMRANI N., SAINTIS L., SARSRI D., BARREAU M., "Prise en compte des interactions multi-domaines lors de l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques". Lambda-mu20 8F-Conception sûre vol. 2, 2016.