

# Prise en compte des interactions multi-domaines lors de l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques

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

**N. Ben Said Amrani et D. Sarsri**

ENSA-Tanger

ENSA-Tanger, BP 1818

Tanger, Maroc

+212 6 63 07 16 18,

[nabil.bensaidamrani@etud.univ-angers.fr](mailto:nabil.bensaidamrani@etud.univ-angers.fr)

[dsarsri@ensat.ac.ma](mailto:dsarsri@ensat.ac.ma)

**L. Saintis et M. Barreau**

LARIS, Université d'Angers

62 avenue Notre Dame du Lac

49000 Angers

0244687544,

[laurent.saintis@univ-angers.fr](mailto:laurent.saintis@univ-angers.fr),

[mihaela.barreau@univ-angers.fr](mailto:mihaela.barreau@univ-angers.fr)

### **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.

### **Summary**

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.*

### **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, étant donné que la notion de mécatronique résulte du couplage entre différentes technologies ou domaines physiques (mécanique, automatique, électronique, informatique...).

L'évaluation de la fiabilité prévisionnelle 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 [1],[2],[3] et [4], 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 toujours un verrou scientifique pour les fiabilistes [15].

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.

D'après la norme française NF E 01010, en 2008, la mécatronique est définie comme une «démarche visant l'intégration en synergie 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 ses fonctionnalités. 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.

Avant d'aborder notre thématique, on définit la notion d'interaction en général et l'interaction multi domaine en particulier. Par définition littéraire d'Edgar Morin (1977, p. 51), l'interaction est une action d'une structure sur une autre « structure étant pris au sens de matière physique », autrement dit, les interactions sont des actions réciproques modifiant le comportement ou la nature des éléments, corps, objets, phénomènes en présence ou en influence.

Dans le domaine industriel, ces interactions peuvent être classifiées en plusieurs catégories : fonctionnelles, dysfonctionnelles, physiques, pluridisciplinaires et en interaction entre le contrôle-commande et la physique. D'après [16], 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.

Dans un premier temps, un état de l'art des travaux existants concernant la prise en compte des interactions lors d'estimation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques est présentée. Puis, une amélioration de la méthodologie est proposée et appliquée sur un cas d'étude d'un système mécatronique issu de la littérature.

## **1. La prise en compte des interactions lors d'évaluation de la fiabilité dans la bibliographie**

À partir des travaux sur l'état de l'art de l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques [14] et [15], nous pouvons remarquer le faible nombre de références portant sur l'aspect interactif, ou qui traitent les interactions multi-domaines lors de l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle :

Genia B. [9] a souligné dans son travail qu'il fallait distinguer entre deux types les interactions pluri-technologies :

- En premier lieu, les interactions entre un processus physique (pressurisation, chauffage, échange de chaleur..) et sa commande, dans lesquels les méthodes « classiques » d'évaluation de la fiabilité trouvent leurs limites.
- En deuxième lieu, les interactions entre les composants logiciels et matériels, celles-ci dues à la présence de réseaux de communication, de traitements de type multitâches, multiplexage au sein de la commande.

Selon S. Khalfaoui [12], [13], les interactions partagent la même variable continue pour plusieurs modules. Cette variable est probablement affectée par l'occurrence d'une défaillance dans un des composants du système, et ce partage causerait la défaillance d'un autre composant. Cette variable peut être représentée dans un modèle de réseaux de Petri (RDP) à une unique place, à laquelle est associé un ensemble d'équations différentielles régissant l'évolution de cette variable.

Selon A. Demri [1] et [2], l'interaction est la relation entre constituants qui se traduit le plus souvent dans les systèmes complexes par un rapport d'influence ou d'échange portant aussi bien sur des flux de matière, d'énergie et/ou d'information. En mécanique, l'interaction se réduit alors à un jeu de forces.

Belhadaoui [7] et [8] a traité l'interaction matériel/logiciel, qu'il a défini comme interaction traduite par la présence d'une couche logicielle exécutée sur l'architecture matérielle.

Dans un travail récent, N. Hammouda [16] a proposé une méthodologie pour traiter les interactions multi-domaines dans un système mécatronique, basée sur l'analyse organique du système étudié. C'est une analyse des interactions organe/organe, qui résulte d'une architecture organique permettant de visualiser l'emplacement des différents composants ou organes ainsi que leurs liaisons. Cette proposition a été illustrée par un modèle de dysfonctionnement cité dans l'analyse qualitative. Il n'est pas possible de modéliser ce dernier par un RDP, parce que une interaction ne peut pas être représentée par une transition : une transition représente le passage du mode fonctionnel au mode défaillant « i » d'un composant, qui est associée à une loi de probabilité, et non une cause de défaillance.

## **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 [17], 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 :

1. Modélisation Qualitative :
  - Analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle (AMDEC)
  - Retour d'expérience.
2. Modélisation des Interactions :
  - Identification des interactions comme des lois d'accélération associées aux stress (facteurs d'influence).
3. 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 (Figure 1).

A partir du schéma présenté en Figure 1, les interactions sont définies comme une relation « cause/ effet » d'un mécanisme de défaillance d'un composant, où la cause générée « Facteur d'influence » vient d'autres domaines :

- Température ;
- Vibrations, chocs ;
- Surpression, Eau huile, chocs;
- Humidité ;
- Surintensité ;
- Surpression ;
- Erreur de paramétrage.

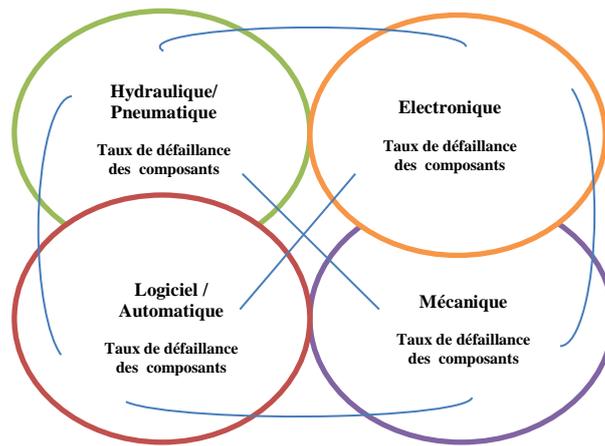


Figure 1. Modèle proposé pour les interactions

En partant de la Méthode AMDEC appliquée au système mécatronique pour la modélisation qualitative dysfonctionnelle, nous présentons dans la Table 1 des exemples de facteur d'influence selon les composants de ce système.

Domaine	Electrique / Thermique	Hydraulique /Pneumatique	Automatique /logicielle
Mécanique	Température Vibration Chocs	Surpression Eau – huile- chocs Fuites	Erreur de paramètre
Electrique Thermique		Température Humidité	Surintensité, Sur tension...
Hydraulique /Pneumatique			Surpression Erreur de paramètre

Table1 : Exemple de facteurs d'influence en fonction de l'interaction multi-domaine

En mécanique, Florent Brissaud [6], P. Lyonnet [14] et Brice Lanternier [5] ont introduit la notion de facteurs d'influence comme des éléments, internes ou externes, qui agissent sur la fiabilité du système. L'influence provoque une modification des taux de défaillance. Ces facteurs peuvent être des facteurs de conception, des facteurs liés à la fabrication (les facteurs  $\Pi_{Process}$  du guide FIDES [10]), des facteurs qui influent lors de l'utilisation, des facteurs de maintenance, des facteurs humains et organisationnels. Nous proposons d'ajouter les interactions multi-domaines pour les systèmes mécatroniques comme de nouveaux facteurs d'influence à prendre en compte.

En général, pour plusieurs interactions sur le même composant, le modèle à hasards proportionnels est le plus approprié. Ce modèle est utilisé en étudiant l'influence de différentes variables intervenant dans le processus de dégradation des composants. Cette particularité nous semble très intéressante pour améliorer l'estimation de la fiabilité des composantes des systèmes mécatroniques. Ceci nous conduit à retenir le modèle de taux de défaillances suivant :

$$\lambda(t, z) = \lambda_0(t) e^{B \cdot Z} \quad (1)$$

Avec

- $\lambda_0(t)$  : le taux de défaillances nominal,
- $Z = [z_1, \dots, z_m]$  le vecteur d'états des facteurs d'influence,
- $B = [b_1, \dots, b_m]$  le vecteur des coefficients du modèle de Cox.

Le vecteur Z correspond aux conditions environnementales du composant qui sont connues, B est déterministe, généralement inconnu, il correspond à la caractérisation de l'influence du procédé de fabrication, des caractéristiques de conception, des conditions d'utilisation. Pour notre cas d'étude de dysfonctionnement, ces caractéristiques seront liées aux valeurs d'activation de dégradation, les composants de ce vecteur restent à estimer.

Les étapes d'estimation des facteurs d'influence du modèle de Cox sont [6] :

- Étape 1 :
  - le recueil des données d'entrées
  - les temps de bon fonctionnement avant défaillance
  - les états associés des facteurs d'influence
- Étape 2 : établissement d'un codage pour les états des facteurs d'influence
- Étape 3 : détermination des paramètres de la fonction d'influence
- Étape 4 : détermination des paramètres du taux de défaillance de base

Lorsque le phénomène de dégradation menant à la défaillance est connu, il est possible d'utiliser la loi d'accélération appropriée. 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:

Reprenant le cas d'application cité dans [17], l'interaction étudiée est celle entre le palier et la bobine dans le système d'actionneur intelligent « Voice Coil ».

#### 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.

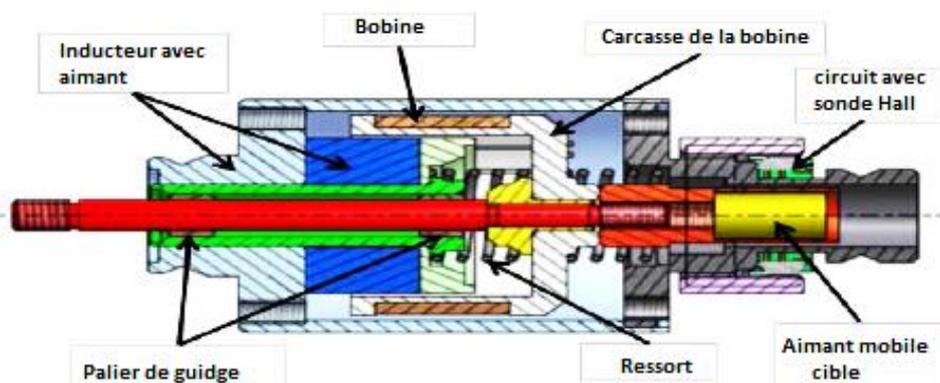


Figure 2. Système actionneur intelligent cité dans N.Hammouda [17]

Notre étude est focalisée sur la phase « Chaud », durant laquelle l'influence de l'interaction Palier /Bobine apparait. Nous nous basons sur le recueil d'expérience cité dans [17] en exprimant ces taux de défaillance en heures<sup>-1</sup> (Table 2).

Composante	Taux de défaillance
Carte de commande	1.72E-07 1/h
Carte de conditionnement	1.16E-061/h
Bobine	5.10E-051/h
Inducteur	5.10E-051/h
Palier de guidage	MTTF= 1.31E+04
	Beta =1.5
Sonde à effet Hall	1.21E-071/h

Table 2 : Taux de défaillance des composants

#### 3.1. Modélisation Quantitative par RDP :

La modélisation qualitative est établie par une analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle, une étude qualitative exhaustive de ce cas d'application a été citée dans [16]. En se basant sur l'expérience de l'industriel, l'étude a mis en évidence les éléments critiques suivants : 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. Le reste des éléments n'est pas pris en compte.

L'évaluation de la fiabilité de notre système été réalisée à partir d'une modélisation du système par un réseau de Petri. En ne prenant en compte que les parties dysfonctionnelles, cette modélisation est faite à l'aide des Réseaux de Petri Stochastiques et Déterministes (RdPSD) à partir de l'outil Pétri Net V12 de la suite logicielle GRIF et est présentée ci-dessous :

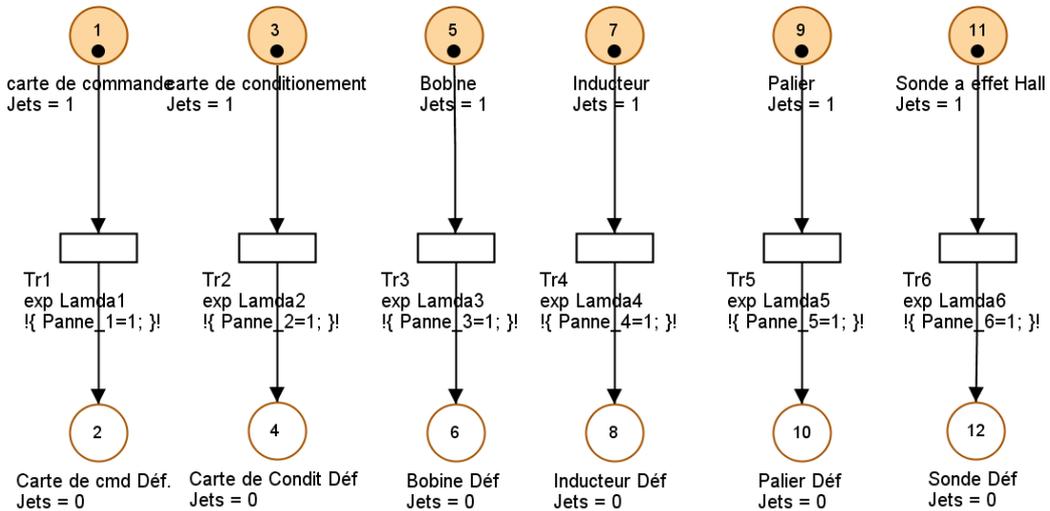


Figure 3. Modélisation RDP à partir de l'outil Pétri Net V12 sans la prise en compte des interactions

Pour représenter la durée de vie, la loi exponentielle a été considérée pour les composants électroniques, et la loi de Weibull pour le palier mécanique. Pour les conditions initiales du réseau de Pétri, le système est considéré comme parfaitement fonctionnel (non défaillant) (Figure 3) avec  $(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6) = (1, 1, 1, 1, 1, 1)$ .

Ce système simple en série a été modélisé par un réseau de Pétri afin d'appliquer la méthodologie avec prise en compte des interactions dans un deuxième temps, ce qui n'est pas possible à partir d'une représentation statique comme, par exemple, les blocs diagrammes de fiabilité.

### 3.2. 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 (carte de commande et de diagnostic, carte de conditionnement de la sonde à effet Hall, sonde à effet Hall, bobine, inducteur avec aimant, et palier de guidage) sont représentées sur la Figure 4. La durée de fonctionnement considérée est de 5000 heures (presque 6 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 2200 heures (2,5 ans) de fonctionnement.

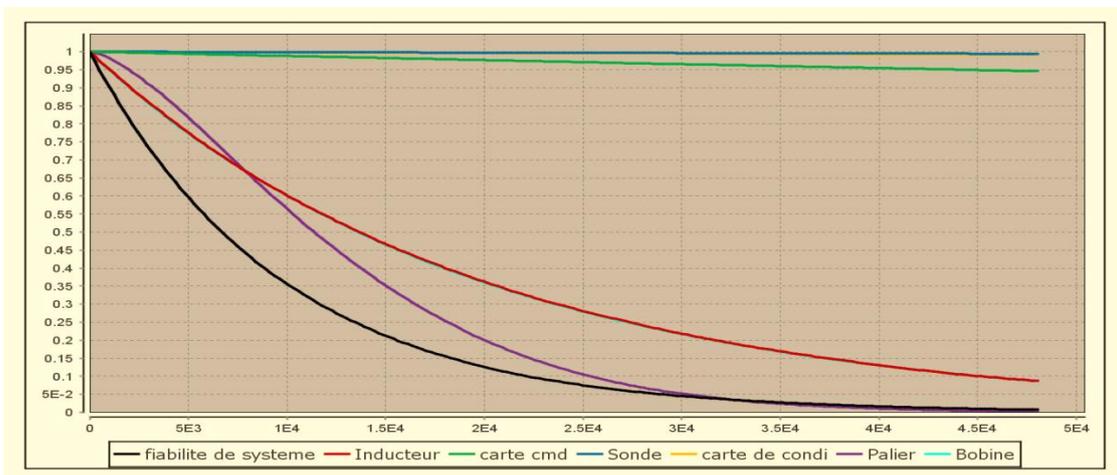


Figure 4. Courbe de fiabilité de système et ses composantes

### 3.3. Modélisation de l'interaction palier/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.

#### Formulation de la loi d'Arrhenius :

Nous considérons le modèle suivant qui, sous l'angle déterministe, relie la durée de vie d'un composant à sa température de fonctionnement:

$$v(T) = A_0 \cdot e(-Ea / K * T) \quad (2)$$

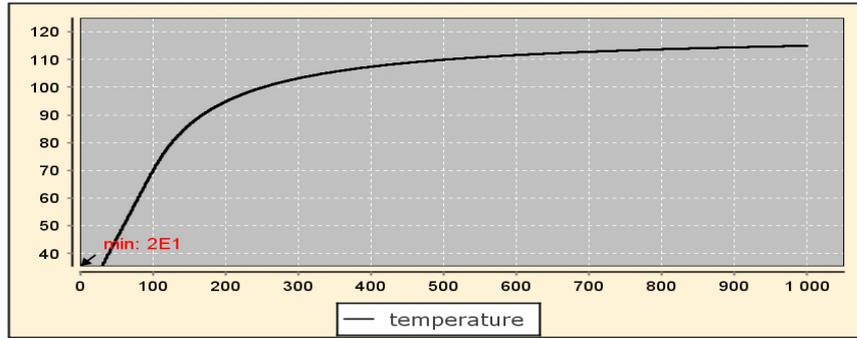
La forme compacte de cette expression, dictée par un souci de généralité, regroupe l'influence de paramètres :

- $U(t)$  : durée de vie de composant,
- Constante de Boltzmann  $k = 8,6171 \times 10^{-5} \text{ eV}/^\circ\text{C}$ ,
- $E_a$  : énergie d'activation paramètre caractérisant la cinétique de dégradation en électron volt (eV). Cette information peut être obtenue dans des recueils de données comme FIDES [20]
- $A_0$  : constante associée au composant.

Le facteur d'accélération  $A_f$  entre deux températures différentes  $T$  et  $T'$  :

$$A_f = T'/T * \exp[-E_a / K * (1/T - 1/T')] \quad (3)$$

Avant de représenter le facteur d'influence « Température », on doit connaître la variation de ce facteur en fonction du temps au niveau de la bobine. Cette courbe d'évolution de la température causée par le fonctionnement dégradé du Palier et le transfert thermique de l'échauffement vers la bobine est représentée sur la Figure 5.



**Figure 5.** Graphe d'évolution de la température de la bobine

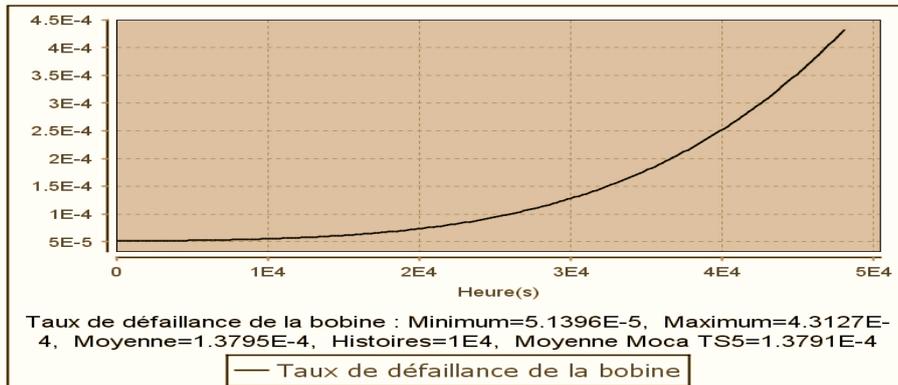
La température varie de 20°C à 120°C en phase « Chaud ». Comme facteur d'influence, l'augmentation de la température au niveau de la bobine va accélérer la défaillance et modifier le taux de défaillance. L'évolution de ce dernier doit être fonction de la température. D'après l'équation citée avant, et dans le cas d'une loi de fiabilité modélisée par une loi exponentielle, ce qui est le cas de la bobine, les considérations thermodynamiques des travaux [17], permettent d'appliquer l'approximation suivante :

$$\lambda(T, T_0, \lambda_0) \cong \lambda_0 \cdot e^{-T_a / T} \quad (4)$$

En considérant une température d'activation  $T_a = 80^\circ\text{C}$ , et en intégrant la variable « température » dans la relation d'Arrhenius :

$$\lambda(T, T_a, \lambda_0) \cong 5.1E-5 + \exp(-80 / \text{Temperature}) \quad (5)$$

La variation du taux de défaillance est représentée dans la Figure 6 :



**Figure 6.** Graphe d'évolution de la température de la bobine

À travers le modèle RDP de la Figure 3, nous avons changé la transition de dysfonctionnement de la bobine vers une transition dynamique au lieu de statique en intégrant de l'équation 5 dans cette transition.

Le graphe de la Figure 6 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 ( $5,1 \cdot 10^{-5}/\text{h}$ ) et arrive à  $4,3 \cdot 10^{-4}/\text{h}$  au bout de  $t = 5000\text{h}$ , ce qui montre une augmentation d'un facteur 10 du taux de défaillance de la bobine.

### **3.4. Modélisation de la fiabilité avec la prise en compte des interactions :**

Sur le même modèle RDP de la Figure 3, on intègre l'équation (5) dans la transition 3 de la bobine, en prenant comme hypothèse  $T_a = 80^\circ\text{C}$ . La fiabilité du système varie selon le taux de défaillance de la bobine (Figure 6) ; celle-ci aussi est proportionnelle avec la température (Figure 5). Cette modélisation est différente de celle de [17], dans laquelle le taux de défaillance de la bobine a été pris comme une constante lors de la prise en compte des interactions.

La Figure 7 représente les courbes de fiabilité avec et sans prise en compte des interactions multi-domaines :

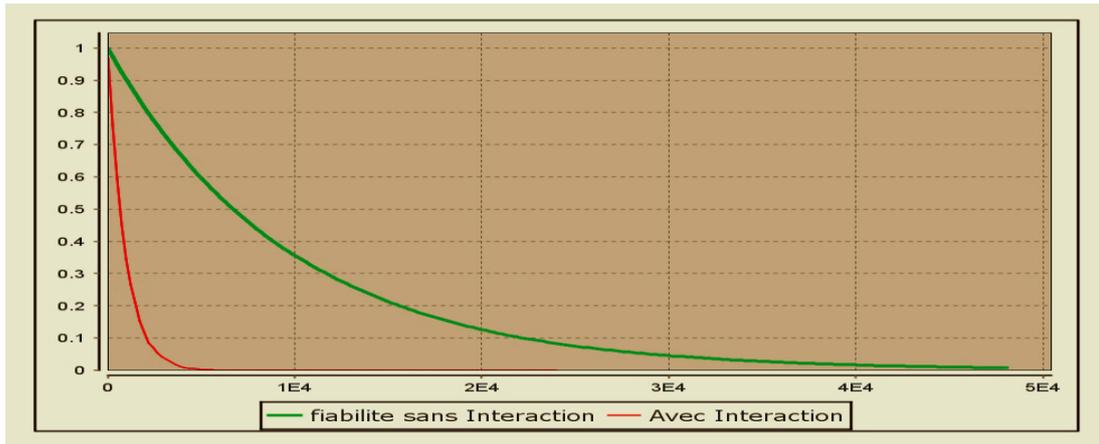


Figure 7. Courbe de fiabilité de système avec la prise en compte des interactions

D'après la figure 7, 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). 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 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.

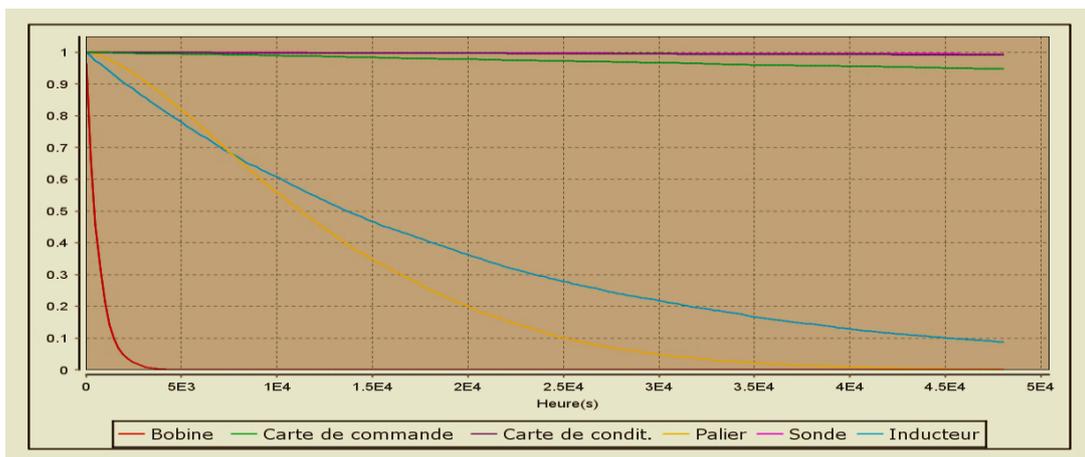


Figure 8. Courbe de fiabilité des composants de système avec la prise en compte des interactions

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.

### 3.5. 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 [17] 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 [17], 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.

### 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, donc la prise en compte de plusieurs interactions. L'application choisie est limitée à une seule interaction, mais cet exemple

industriel issu de la littérature montre l'efficacité de la démarche et le fait que les prévisions qui concernent les interactions sont réalistes. Par la suite, la méthodologie devra être appliquée à des systèmes mécatroniques en prenant en compte plusieurs interactions multi-domaines.

Comme perspective pour modéliser les interactions multi-domaines, la prise en compte de la distance entre les composants de nature différente, comme étant un facteur géométrique modélisé par la distance de Hausdorff traitée en [11], nous semble une piste intéressante.

Pour la modélisation du système mécatronique, l'outil Bond Graph semble assez performant en termes fonctionnels, comme une représentation graphique d'échange de la puissance (effort, flux). Il est possible de l'utiliser pour modéliser la dégradation des composants, et dans ce cas représenter les interactions multi-domaines comme de nouveaux liens de transfert d'énergie, afin d'avoir un Bond graph représentant les quantités des facteurs d'influence identifiés.

Une autre perspective de nos travaux est l'utilisation combinée des modèles de réseaux de Pétri et de Bond graph en mode dysfonctionnel, ce qui reste un verrou scientifique. Actuellement son utilisation est limitée à une juxtaposition des modèles en version fonctionnelle, dédiée au diagnostic. Cette approche pourrait être prolongée au domaine de la fiabilité des systèmes mécatroniques dans de futurs travaux.

## **Références**

- [1] A. Demri, A. Charki, F. Guerin, M. Barreau, et H. Christofol, « Fiabilisation d'un système mécatronique dès la phase de conception », in *18ème Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, 2007.
- [2] A. Demri, « Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle », phdthesis, Université d'Angers, 2009.
- [3] A. G. Mihalache, « Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué », phdthesis, Université d'Angers, 2007.
- [4] M. Barreau, A. Todoskoff, A. Mihalache, F. Guerin, et B. Dumon, Dependability assessment for mechatronic systems: electronic stability program (ESP) analysis. IFAC AVCS International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety, Gênes, Italia, 2004.
- [5] B. Lanternier, D. Charpentier, et P. Lyonnet, « Modélisation de taux de défaillance en mécanique », présenté à Colloque de maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement « Risques et performances », 2006, p. 4.
- [6] F. Brissaud, B. Lanternier, D. Charpentier, et P. Lyonnet, « Modélisation des taux de défaillance en mécanique - Combinaison d'une loi de Weibull et d'un modèle de Cox pour la modélisation des taux de défaillance en fonction du temps et des facteurs d'influence », in *Performances et Nouvelles Technologies en Maintenance, PENTOM 2007*, Mons, Belgium, 2007.
- [7] H. Belhadaoui, O. Malassé, J.-F. Aubry, V. Idasiak, et C. Cassier, « Outils d'aide à la conception de systèmes mécatroniques sûrs de fonctionnement », in *7ème Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sûreté de Fonctionnement, Qualita 2007*, Tanger, Morocco, 2007, p. 426-433.
- [8] H. Belhadaoui, « Conception sûre des systèmes mécatroniques intelligents pour des applications critiques », thèse doctorale, Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2011.
- [9] J.-F. Aubry, G. Babykina, A. Barros, N. Brinzei, G. Deleuze, B. De Saporta, F. Dufour, Y. Langeron, et H. Zhang, « Rapport final du projet APPRODYN : APPROches de la fiabilité DYNAMique pour modéliser des systèmes critiques », mars 2012.
- [10] Guide FIDES 2009, Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques, Édition Septembre 2010.
- [11] T. Soriano, M. Zerelli, T. H. Gallois, et A. Warniez, « Quantifying reliability of a mechatronic system using Hausdorff distance in state space », in *2014 10th France-Japan/ 8th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS)*, 2014, p. 47-52.
- [12] S. Khalfaoui, « Méthode de recherche des scénarios redoutés pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde automobile », phdthesis, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2003.
- [13] S. Khalfaoui, E. Guilhem, H. Demmou, et R. Valette, « Une méthode pour obtenir des scénarios critiques dans les systèmes mécatroniques », in *Colloque Européen de Sûreté de Fonctionnement (Im13)*, Palais des Congrès, Lyon, France, 2002, vol. 21.
- [14] N. Bensaïd Amrani et D. Sarsri, « Estimation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques », in *Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées*, Tanger, Morocco, 2015.
- [15] N. B. Amrani, L. Saintis, D. Sarsri, et M. Barreau, Evaluating the predicted reliability of mechatronic systems: state of the art, *Mechanical Engineering: An International Journal*, Vol. 3, No. 2, May 2016.
- [16] N. Hammouda, G. Habchi, C. Barthod, J. Lottin, et O. Duverger, « Implementation of a methodology for evaluation of the reliability of mechatronic systems », in *2014 10th France-Japan/ 8th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS)*, 2014, p. 41-46.
- [17] N. Chouket, G. Habchi, C. Barthod, et O. Duverger, « Fiabilité des systèmes mécatroniques en utilisant la modélisation et la simulation », in *MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*, Nancy, France, 2014.
- [18] P. Lyonnet, R. Toscano, P. Maisonneuve, et B. Lanternier, « Modélisation de la fiabilité des macro-composants mécanique à partir de modèles mathématiques et de réseaux de neurones, comparaisons des méthodes », présenté à 24. Machinery vibration seminar, Montreal, Canada, 2006, p. 372-385.