

## Simulation numérique de la fiabilité dynamique d'un composant d'un système dans le logiciel RELSYS® :

Jérôme de Reffye,  
*PI-RAMSES Consulting*  
10, rue Carnot, 78000 Versailles  
[dereffye.pi-ramses@sfr.fr](mailto:dereffye.pi-ramses@sfr.fr)

### RESUME :

Un modèle de faisabilité de la méthodologie RELSYS® a été développé et présenté ( 1,2,3,4)

On présente maintenant les algorithmes internes originaux permettant de calculer des probabilités de défaillance en fonction du temps. On se place donc au niveau « composants » du code, le niveau « système » étant traité dans une autre présentation des JDS 2014.

La première étape est de calculer les probabilités de défaillance à l'origine des temps (composant neuf mis en service) en fonction des incertitudes sur les paramètres de contrainte et de résistance dans la méthode résistance – contrainte utilisée. Ce sont des probabilités stationnaires par principe.

Puis, on désire calculer les probabilités de défaillance en fonction du temps (fiabilité dynamique) par la construction de modèles de dégradation adaptés aux modes de défaillance pris en compte :

Fatigue, usure, fissuration, corrosion de composants mécaniques, corrosion de composants électroniques.

Le comportement probabiliste de la dégradation au cours du temps est pris en compte :

- Pour les dégradations basées sur un processus physique, par un double mouvement brownien, l'évolution de la dégradation suivant un mouvement brownien drifté, tandis que les contraintes appliquées suivent un mouvement brownien centré.
- Pour les dégradations basées sur un processus chimiques, leur évolution suit un processus de diffusion.

La probabilité de défaillance est toujours définie comme la probabilité que la contrainte dépasse la résistance. Ce calcul est effectué sur l'enveloppe supérieure du mouvement brownien dans le cas de processus physiques, ou directement dans le cas de processus chimiques.

Pour les défaillances des semi-conducteurs qui sont caractérisées par un claquage par destruction des jonctions, donc par une défaillance immédiate sans processus de dégradation, un modèle spécifique de défaillances a été développé. On suppose une arrivée aléatoire de surcharges sur le circuit de contrôle – commande et on calcule la probabilité que l'intensité dans les semi-conducteurs ou la température de leur jonction dépassent les limites ultimes.

Enfin, la croissance de fiabilité des logiciels est basée sur un modèle qui tient compte de l'application de méthodes formelles et d'un débogueur présumé parfait.

Les résultats sont présentés sous forme de courbes de l'évolution des probabilités de défaillance en fonction du temps avec leur intervalle de confiance et les deux exemples traités sont le système bielle-manivelle d'un moteur à vapeur et un treuil électrique avec une vitesse régulée.

La simulation numérique de la fiabilité dynamique d'un système est un grand progrès dans la possibilité de pouvoir remplacer des essais par des calculs beaucoup moins coûteux et faire varier des paramètres en notant les effets sur la fiabilité de l'ensemble, etc... comme on le fait couramment dans la simulation des structures mécaniques dans les bureaux d'étude.

**Mots-clé :**

Simulation numérique. Fiabilité dynamique. Calculs mécaniques résistance – contrainte. Semi-conducteurs. Processus stochastiques. Mouvement brownien. Processus de Poisson. Equation différentielle du second ordre.

**ABSTRACT :**

A feasibility modelling of the RELSYS® methodology was developed and presented ( 1,2,3,4)  
One now presents the original algorithms allowing calculate the failure probabilities versus the time.  
Then we are at the component level in the system architecture and the system level is presented in an other paper of the JDS2014.

The first step is to calculate the stationary failure probabilities at the time origin when the system is new (commissioning of the system) with regard to the uncertainties of parameters in the strength – stress method.

Second one would like to calculate the time – depending probabilities ( dynamical reliability) by the building of damage modelling matched to the failure modes taken on account :

- Wearing
- Tearing
- Cracking
- Corrosion of mechanical components
- Corrosion of electrical components

The random behaviour of the damage is taken on account:

- For the physical process based ones by a double motion Brownian the damage evolution by a drifted one and the stress by a centred one.
- For the chemical process based ones by a diffusion process.

The failure probability is almost defined by an overcrossing of the strength by the stress.

This calculation is made on the max of the brownian motion for the physical processes and directly for the chemical processes.

The semi-conductors are characterized by a very quickly failure due to the junction destruction. So the failure is immediate without damage process.

The random character is due to the random arrival of electrical overstress due to overloads.

We had to develop a specific modelling to take on account this type of failures.

This one is based on a second order differential equation driven by a stochastic excitation.

Third the reliability growth of software is based on modelling what takes on account the application of formal method and a perfect debugger.

The results are shown with curves of time - depending failure probabilities with their confidence intervals.

We show two examples as the rod-crank system for mechanical components and a hoist with a programmable electronic control-command of the DC motor.

The numerical simulation of the dynamical reliability is a big progress in the possibility to can replace physical and expensive trials by runs of software and one can vary the values of parameters and measure their effects and influence on the values of reliability parameters of the system. This approach is now very often used if the mechanical engineering.

### Key Words:

Numerical simulation. Dynamical reliability. Mechanical calculation. Strength –stress method. Semi-conductors. Stochastic processes. Brownian motion. Poisson process. Second order differential equation.

### Introduction

La fiabilité d'un composant est actuellement obtenue soit par des valeurs extraites de bases de données, soit par des valeurs expérimentales corrigées des effets thermo-mécaniques. Il n'existe pas de méthode permettant un calcul de probabilités de défaillance uniquement à partir de modèles mathématiques de la physique tels que ceux que l'on rencontre dans la simulation numérique de la physique.

La simulation numérique de la fiabilité d'un composant est à l'intersection de deux disciplines :

- La simulation numérique de phénomènes physiques
- La simulation numérique de phénomènes aléatoires

C'est la principale difficulté rencontrée. Or, la bonne approche de développement d'un modèle physico-probabiliste est de définir d'abord le cadre probabiliste, puis y intégrer le cadre physique par immersion.

Comme cette méthode n'était pas possible dans les gros codes de calcul numérique de la mécanique, thermique, Mécanique des Fluides, Electromagnétisme, etc., on a développé le calcul d'incertitudes pour pouvoir introduire l'aspect aléatoire.

En ce qui nous concerne, nous avons cette chance de pouvoir adopter tout de suite la bonne méthode.

### Le modèle mathématique

Le modèle mathématique du calcul de la probabilité de défaillance dépendante du temps par couple (composant, mode) est basé sur :

Le calcul des probabilités à l'origine par une méthode résistance-contrainte

Un modèle de dégradation représentant le phénomène physique du mode de défaillance considéré,

Une représentation de l'aspect aléatoire du phénomène par un mouvement brownien,

Le calcul procède par étapes :

La probabilité à l'origine est une probabilité stationnaire qui prend en compte les incertitudes sur les paramètres de contrainte et sur les paramètres de résistance. Nous avons adopté, comme méthode, un calcul en valeurs moyennes qui fait appel à la comparaison de deux lois gaussiennes qui diffèrent par leur moyenne. La probabilité de défaillance est la probabilité que la contrainte dépasse la résistance

## 46° journées de statistique de la SFdS, Rennes, Juin 2014

On suppose que, si le composant n'est pas tombé en panne à l'origine, il va subir le phénomène de dégradation, qu'il soit physique ou chimique. Le deuxième événement dépend du phénomène de dégradation et les deux événements sont indépendants.

La probabilité de défaillance est calculée par la formule suivante :

$$P_f(t) = P_{f0} + P_{f'}(t) - P_{f0} + P_{f'}(t)$$

Où  $P_{f0}$  est la probabilité de défaillance à l'origine et où la probabilité de défaillance due à la dégradation est égale à :

$$P_{f'}(t) = P(\sigma_f \geq D_0 / m_0 = M_0) = \int (1 + e^{\frac{2M_0 \cdot D_0(\sigma_0)}{\sigma_D^2}}) \left[ N\left(\frac{-D_0(\sigma_0) - M_0 t}{\sigma_D \sqrt{t}}\right) - N\left(\frac{D_0(\sigma_0) - M_0 t}{\sigma_D \sqrt{t}}\right) \right] \frac{dP_{Str}(\sigma_0)}{d\sigma_0} d\sigma_0$$

Où la contrainte appliquée  $\sigma_0$  est considérée comme aléatoire autour de sa valeur nominale.

Ensuite, on introduit les résultats d'essais. Généralement ceux-ci sont réduits à un taux de défaillance avec son intervalle de confiance.

On fusionne les résultats de la manière suivante :

On calcule la valeur moyenne de la fonction temporelle du taux théorique :

Puis, on compare cette valeur à la valeur du taux expérimental.

On adopte le max des deux, puis le max de cette dernière valeur avec la courbe des taux de défaillance théoriques pour avoir un calcul majorant de sécurité.

Ce taux fusionné est ensuite réactualisé des effets de la maintenance

Puis on fusionne le taux corrigé avec le taux de défaillance du composant observé par le système de diagnostique d'analyse des données de Retour d'Expérience.

On obtient alors la fiabilité du composant en fonctionnement dans le système avec sa maintenance.

### Premier cas : le système bielle - manivelle

Le système a été décomposé selon ses composants principaux :

- Tige de piston
- Glissière
- Bielle
- Maneton de roue motrice

On commence par calculer les probabilités de défaillance à l'origine.

En fonction des données utilisées, on a obtenu les résultats suivants pour les cinq couples (composant, mode de défaillance) pris en compte :

- Axe du Piston : Déformation au-delà de la limite élastique en traction-compression. probadef01 = 0.0000003
- Glissière : force appliquée perpendiculaire au mouvement donc sur la section latérale de la glissière, donc sur sa surface de frottement. probadef02 = 8.033D-09
- Bielle motrice en traction-compression. probadef03 = 2.342D-11

- Bielle motrice en flexion faible due à l'inertie.  $\text{probadef04} = 9.313\text{D-}10$
- Cisaillement et Torsion et du maneton.  $\text{probadef05} = 0.0000111$

Les deux modes de la bielle ont été regroupés dans la suite des calculs. Par contre, le cas d'une bonne lubrification a été distingué de celui d'une mauvaise lubrification pour les deux organes soumis à frottement, la glissière et le maneton. On obtient les probabilités de défaillance suivantes :

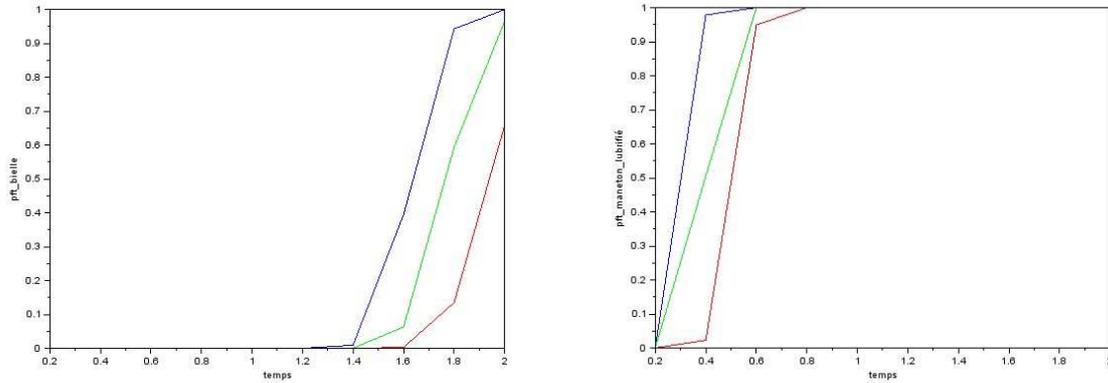


Figure 1 : exemples de probabilités de défaillance par composant au cours du temps.

## Deuxième cas : le treuil électrique : défaillances de l'électronique et du logiciel

Le treuil électrique est un système composé de mécanique, l'électronique de commande et de logiciel de programmation de fonctions.

Les composants mécaniques sont traités de la même manière que les composants mécaniques du système bielle-manivelle.

Nous allons nous intéresser aux composants électroniques et logiciels.

- Le modèle est un moteur à courant continu alimenté et contrôlé par un semi-conducteur de puissance.
- Les surcharges sont distribuées selon un Processus de Poisson homogène.

Le système différentiel du second ordre excité par une fonction aléatoire est résolu temporellement et non dans l'espace de Laplace.

La probabilité de défaillance est celle de la réalisation des deux événements suivants :

- Surintensité
- Sur-température

La courbe l'évolution de la probabilité en fonction du temps est la suivante pour un jeu de paramètres particulier :

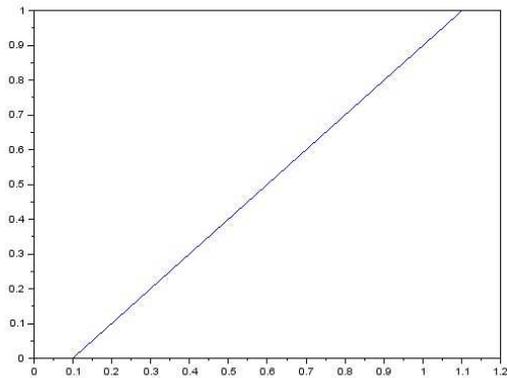


Figure 2 : Evolution de la probabilité de défaillance du semi-conducteur de puissance en fonction de l'arrivée des overstress

La croissance de fiabilité du logiciel de contrôle – commande est basée sur la remarque suivante : Durant l'exploitation du logiciel, les erreurs apparaissent dans les changements de configuration d'utilisation et, en fonction de leur correction, elles obéissent à une loi d'abord croissante, puis décroissante. On a adopté comme modèle une bi-exponentielle qui répond bien à la représentation de phénomènes transitoires. On a supposé 5000 erreurs à corriger sachant qu'un quart a été résolu formellement et un quart résolu en débogage. On donne l'évolution de la fiabilité du logiciel en exploitation :

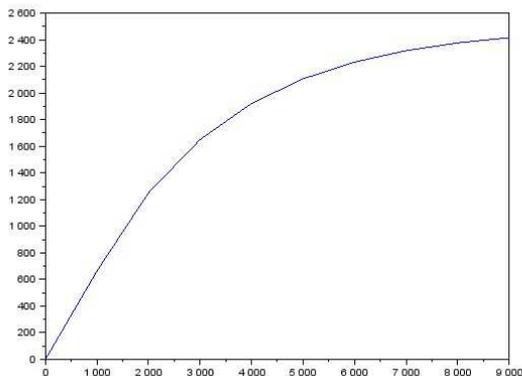


Figure 3 : Evolution du nombre d'erreurs logiciel résolues en fonction de son utilisation au cours du temps

## Références bibliographiques :

- [1] : Jérôme de Reffye, *PI-RAMSES Consulting*, 45° journées de Statistiques, Toulouse, France  
RELSYS® methodology and software for calculating the reliability parameters by the scientific calculation
- [2] : Jérôme de Reffye, *PI-RAMSES Consulting*, ALT'2012, Rennes, France  
Reliability of a system from the one of its components and the REX using a strength-stress method linked with a Bayesian net
- [3] J. V. de Reffye, *PI-RAMSES Consulting*, PSAM 11, ESREL 2012, Helsinki, Finland  
RELSYS® methodology and software for calculating the reliability parameters by the scientific calculation
- [4] : Jérôme de REFFYE , Société Pi-Ramses, , Lambdamu 18, 2012, Tours, France  
Synthèse des méthodes d'estimation de la fiabilité des composants et des systèmes par le calcul scientifique : le logiciel RELSYS®