Modèles fiabilistes intégrant des mesures d'état de dégradation

Christophe Letot, Service de Génie Mécanique & Pôle Risques

1. Contexte

La maintenance intelligente bénéficie de l'acquisition et du traitement des données industrielles hétérogènes permettant d'améliorer l'estimation des durées de vie résiduelles des équipements utiles à la définition de politiques de maintenance optimisées. Ces données regroupent aussi bien des historiques de défaillances et d'interventions que des mesures indirectes de l'état de dégradation des équipements (température, vibration, ...). Pour estimer les durées de vie résiduelles, trois approches sont envisageables : une approche basée sur les modèles physiques de défaillance, une approche qui repose sur des modèles fiabilistes et une dernière approche qui utilise des mesures provenant de la surveillance des machines.

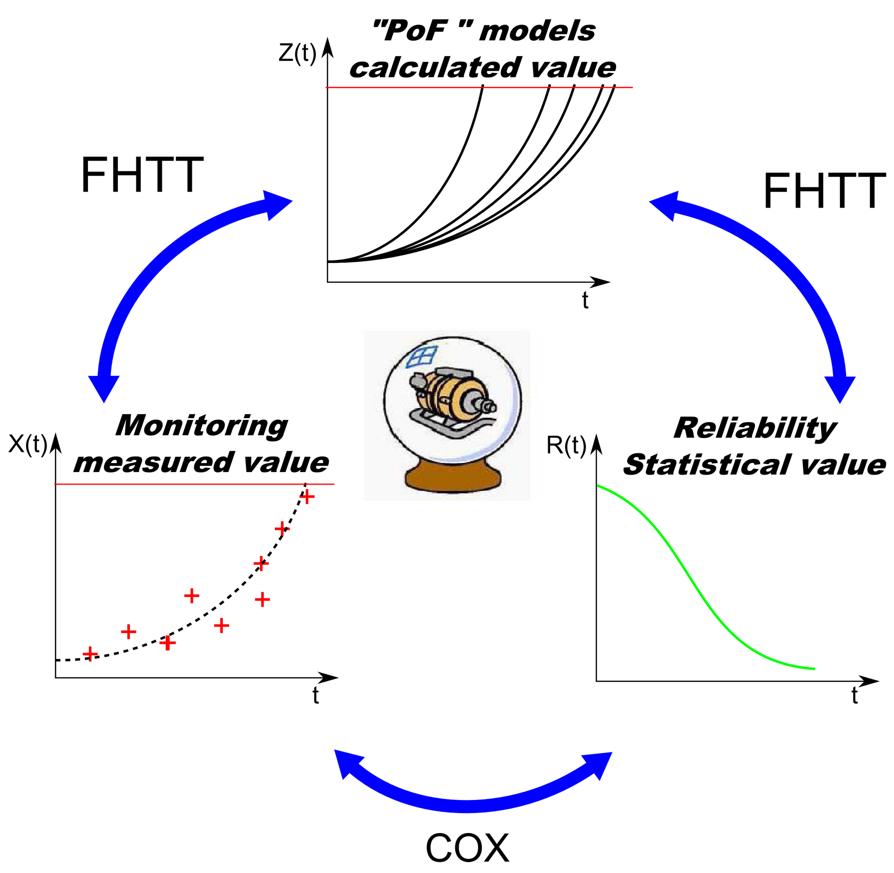


Figure 1 : Les trois approches pour l'estimation des durées de vie résiduelles

L'approche dite du condition monitoring peut être reliée à l'approche statistique par le modèle de Cox [1]. Nous nous intéressons plutôt aux modèles dits **First Hitting Threshold Time (FHTT)** [2] qui permettent de relier les différentes approches.

2. Théorie des modèles FHTT

Les modèles FHTT cherchent à déterminer le premier temps d'atteinte d'un seuil critique par un processus stochastique. Ils sont donc constitués :

- d'une fonction stochastique $Z(t)$ qui représente l'évolution de la dégradation ;
- d'un seuil de dégradation critique z_c correspondant à la défaillance

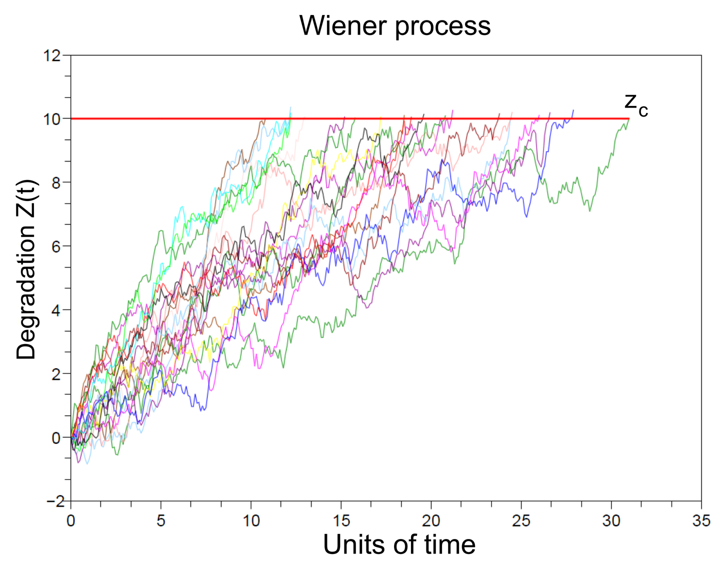


Figure 2 : Exemple de courbes de dégradation stochastiques selon un processus de Wiener.

La fiabilité d'un équipement est la probabilité que le temps de défaillance T_c de cet équipement soit supérieur à un instant t considéré.

$$R(t) = P(T_c > t) \tag{1}$$

Le lien avec les modèles FHTT est dès lors immédiat. Au temps T_c le seuil de dégradation est atteint.

$$Z(T_c) = z_c \Leftrightarrow T_c = Z^{-1}(z_c) \tag{2}$$

Une quantification du dommage D peut être obtenue en comparant la valeur de la dégradation actuelle par rapport à sa valeur critique.

$$D(t_i) = \frac{Z(t_i) - Z(t_0)}{Z(T_c) - Z(t_0)} \tag{3}$$

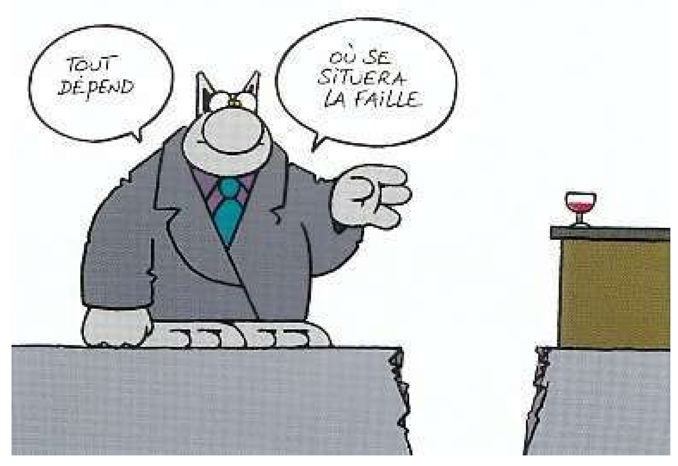
Finalement, la durée de vie résiduelle moyenne peut être évaluée sur base de la fonction de fiabilité $R(t)$.

$$\mathrm{MRL}(t) = \frac{\int_t^\infty R(t)dt}{R(t)} \tag{4}$$

3. Application : la fissuration

Le modèle de dégradation considéré est la loi de Paris [3] qui lie l'évolution de la taille d'une fissure a en fonction du nombre du cycles N par le facteur de concentration de contrainte $\Delta K(\sigma, a, F(a))$, σ étant la contrainte appliquée et $F(a)$ un facteur de correction géométrique.

La problématique de la fissuration...



Tiré et adapté de le chat de Geluck

$$\frac{da}{dN} = C\,\Delta K^m \tag{5}$$

On considère que le paramètre C propre à chaque pièce est entaché d'une certaine dispersion selon une loi de Weibull(η_c, β_c) par exemple. On considère une taille de fissure critique a_c à partir de laquelle la pièce est défaillante. On peut montrer que le nombre de cycles N_c nécessaires pour atteindre ce seuil est :

$$N_c = \frac{a_c^{-(m/2)+1} - a_0^{-(m/2)+1}}{(-(m/2)+1)(C\,\sigma^m\,\pi^{m/2})} \tag{6}$$

La fiabilité étant $R(N) = P(N_c > N)$, on isole le paramètre C dont on connait l'expression de sa distribution pour obtenir :

$$R(N) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{a_c^{-(m/2)+1} - a_0^{-(m/2)+1}}{(-(m/2)+1)(\sigma^m\,\pi^{m/2})\;N\;\eta_c}\right)^{\beta_C}\right) \tag{7}$$

Pour comparer les résultats prédits avec des données simulées, il est préférable d'utiliser la fonction complémentaire de la fiabilité à savoir la fonction de défaillance $F(N) = 1 - R(N)$.

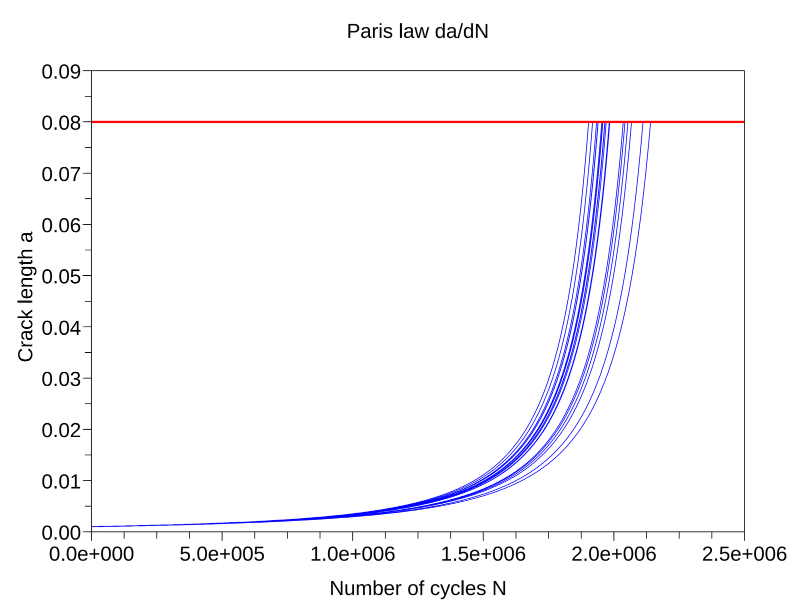


Figure 3 : Evolution de la fissuration a en fonction du nombre de cycles N pour 20 échantillons

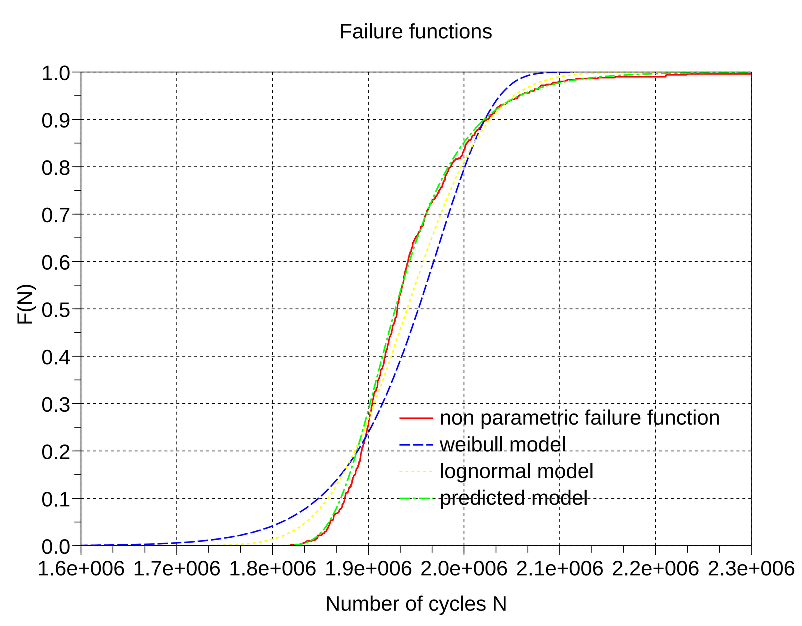


Figure 4 : Comparaison des fonctions de défaillances (F = 1-R) simulée, ajustées et prédite

On constate sur la figure 4 que le modèle prédit (en vert) présente une meilleure adéquation avec les données simulées (en rouge) que les modèles classiques ajustés de Weibull et lognormal.

Pour un dommage de 50%, on peut alors prédire la durée de vie résiduelle moyenne. L'équation 3 nous donne la valeur de la fissuration correspondant à ce niveau de dommage. L'équation 6 nous donne le nombre de cycles moyen pour lequel ce dommage est atteint. Enfin, l'équation 4 nous donne la valeur du MRL = 126334 cycles.

Comme **perspective**, la méthode FHTT devra être appliquée à des courbes de dégradation non monotones comme celles obtenues lors des relevés vibratoires de machines mécaniques tournantes.

4. Références

[1] Cox,D. R. *Regression Models and Life Tables (with Discussion)*, Journal of the Royal Statistical Society, Series B 34 :187-220, 1972.

[2] Mei-Ling Ting Lee and G.A. Whitmore, *Threshold regression for survival analysis : Modeling event times by a stochastic process reaching a boundary*, Statistical Science, 4 :501-513, 2006.

[3] P. Paris, *F. Erdogan, A critical analysis of crack propagation laws.* Journal of Basic Engineering 85 :528-534, 1963.

Contact : christophe.letot@umons.ac.be