

Politique de maintenance dynamique pour un système soumis à une dégradation indirectement observable

K.T. Huynh, A. Barros et C. Bérenguer

Institut Charles Delaunay - UMR CNRS 6279
Université de technologie de Troyes, France

Réunion GT S3, Paris, France

- 1 Motivations et objectifs
- 2 Modèle de dégradation & modèle de mesure
- 3 Estimation de l'état réel de dégradation
- 4 Modèles de maintenance
 - Hypothèses et critère d'évaluation de la performance
 - Modèles de maintenance dynamiques
 - Modèles de maintenance non dynamiques (références)
- 5 Comparaison et discussions
 - Comparaison
 - Conclusion

Motivations et objectifs

Problème de surveillance

Surveillance parfaite: largement étudié mais irréaliste, difficile, coûteuse, etc.

⇒ **Surveillance imparfaite: réaliste mais peu étudiée**

Problème de maintenance

Structure statique: largement étudié mais moins efficace (coût intervention inopportune, indisponibilité)

⇒ **Structure dynamique: permettant de déduire ces type de dépense**

Objectifs de travail

- Considérer un système mono-composant fonctionné sous la surveillance indirecte
- Reconstruire l'état de dégradation à partir des mesures bruitées, et prédire des quantités liées à la condition de santé du système
- Proposer les politiques de maintenance dynamiques
- Évaluer les performances des politiques dynamiques en comparant aux celles statiques

Modèle de dégradation & modèle de mesure

Modèle de dégradation - propagation de fissure

Modèle de Paris-Erdogan - processus Markovien à accroissements non-stationnaires

$$\frac{dx}{dt} = C (\beta \sqrt{x})^n \xrightarrow{\text{Discretiser}} x_{t_i} = x_{t_{i-1}} + e^{\omega t_i} C (\beta \sqrt{x_{t_{i-1}}})^n \Delta t$$

x_{t_i} : l'état de dégradation caché à t_i , $\omega_{t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\omega^2)$, C, β, n : paramètres constants
 Panne du système: $x_{t_i} \geq d$ (l'épaisseur critique du matériel)

Modèle de mesure - inspection non destructive par ultrasons

Modèle logit:

$$\ln \frac{z_{t_i}}{d - z_{t_i}} = \beta_0 + \beta_1 \ln \frac{x_{t_i}}{d - x_{t_i}} + v_{t_i}$$

z_{t_i} : mesure à t_i (covariable bruitée), $0 < x_{t_i} < d \Rightarrow 0 < z_{t_i} < d$, $v_{t_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_v^2)$,
 $\beta_0 \in \mathbb{R}$, $\beta_1 > 0$: paramètres constants

Estimation de l'état réel de dégradation

État estimé de dégradation

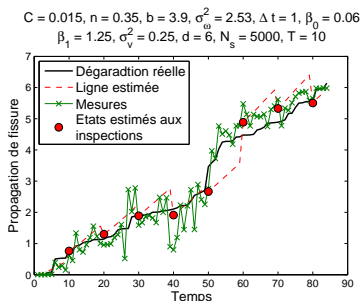
- $\mathbf{z}_{t_0:i}$: la seuil information dont on dispose
- L'état estimé de dégradation: $\hat{x}_{t_i} = E_{p(x_{t_i} | \mathbf{z}_{t_0:i})} (x_{t_i}) = \int x_{t_i} p(x_{t_i} | \mathbf{z}_{t_0:i}) dx_{t_i}$
- $p(x_{t_i} | \mathbf{z}_{t_0:i})$ difficile à calculer \Rightarrow **filtrage particulaire**

Estimation par filtrage particulaire

- Approcher $p(x_{t_i} | \mathbf{z}_{t_0:i})$ par la distribution empirique de $\{\hat{x}_i^{(k)}, w_i^{(k)}\}_{k=1}^{N_s}$
- Filtrage Bayésien récursif:
 - Prédiction de $\tilde{x}_{t_i}^{(k)}$,
 - Correction de $w_{t_i}^{(k)}$,
 - Redistribution: $\{\tilde{x}_{t_i}^{(k)}, w_{t_i}^{(k)}\} \rightarrow \{\hat{x}_{t_i}^{(k)}, \frac{1}{N_s}\}$.
- Estimation de la densité: $\hat{p}(x_{t_i} | \mathbf{z}_{t_0:i}) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \delta_{\hat{x}_{t_i}^{(k)}}(x_{t_i})$
- État estimé de dégradation: $\hat{x}_{t_i} = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \hat{x}_{t_i}^{(k)}$

Exemple et calcul de la fiabilité

Exemple numérique



Calcul de la fiabilité

$$R_{T_i+j\Delta t} = P \{x_{T_i+j\Delta t} < d \mid x_{T_i} < d, \mathbf{z}_{T_{0:i}}\} \simeq \frac{\sum_{m=1}^{N_s} \mathbf{1} \left\{ \tilde{x}_{T_i+j\Delta t}^{(m)} < d \right\}}{\sum_{n=1}^{N_s} \mathbf{1} \left\{ \hat{x}_{T_i}^{(n)} < d \right\}}$$

$\hat{x}_{T_i}^{(n)}$: dégradation estimée à T_i , $\tilde{x}_{T_i+j\Delta t}^{(m)}$: dégradation prédictive à $T_i + j\Delta t$

Hypothèses et critère d'évaluation de la performance

Hypothèses

- Défaillance auto décelable et dégradation cachée
- Dégradation révélée instantanément par une inspection (C_i)
- Deux actions de maintenance: remplacement préventif ($C_p > C_i$) and correctif ($C_c > C_p$) \Rightarrow Renouveler le système
- Remplacement aux instants discrets prédéterminés \Rightarrow Durée d'indisponibilité (C_d)
- Toutes les interventions sont prises le temps négligeable

Critère de performance économique (hors ligne)

Coût asymptotique par unité de temps

$$C^\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(t)}{t} \simeq \frac{\sum_{n=1}^N C(S^{(n)})}{\sum_{n=1}^N S^{(n)}}$$

N : nombre des histoires simulées suffisamment grand, $S^{(n)}$: 1^{er} cycle de renouvellement de $n^{\text{ème}}$ histoire

Politique D-R (non-conditionnelle et dynamique) (1)

Principe

Autoriser une intervention entre deux inspections successives d'une structure périodique

Règles de décision

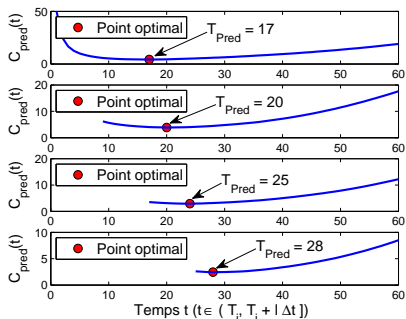
- Inspecter périodiquement à $T_i = iT$,
- Si panne à T_i , remplacer correctivement,
- Si non, reconstruire \hat{x}_{T_i} et un remplacement (préventif ou correctif) est programmé à T_{pred} tel que $C(T_{pred})$ soit minimum sur $(0, T_i + I\Delta t]$, avec

$$C(T_i + I\Delta t) = \frac{C_p R_{T_i + I\Delta t} + C_c \bar{R}_{T_i + I\Delta t} + C_d \Delta t \sum_{k=1}^I \bar{R}_{T_i + k\Delta t} + iC_i}{T_i + I\Delta t},$$

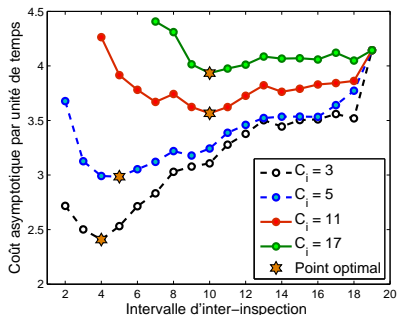
- Si $T_{pred} \leq T_{i+1}$, remplacer (soit correctivement, soit préventivement) à T_{pred} ,
- si $T_{pred} > T_{i+1}$, même démarche de décision se recommence à T_{i+1} ,
- Variables à optimiser: T_{pred} (en ligne) et T (hors ligne).

Politique D-R (non-conditionnelle et dynamique) (2)

Optimisation en ligne (T_{pred})



Optimisation hors ligne (T)



$C = 0.0047$, $n = 0.35$, $\beta = 3.9$, $\sigma_\omega^2 = 4.8326$, $\Delta t = 1$, $\beta_0 = 0.06$, $\beta_1 = 1.25$,
 $\sigma_v^2 = 0.0625$, $d = 6$, $N = 4000$, $N_s = 3000$, $C_p = 50$, $C_c = 100$ and $C_d = 250$

Politique Q-I/R (conditionnelle et dynamique) (1)

Principe

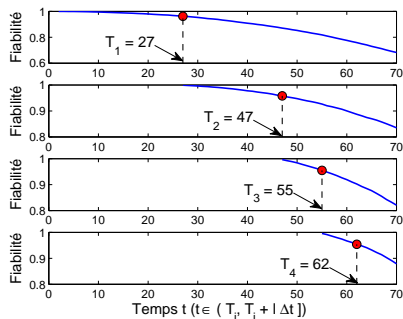
Remplacer complètement la structure d'inspection périodique par une structure adaptative optimisée en fonction de l'état de santé du système

Règles de décision

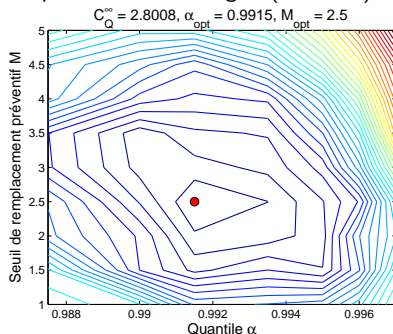
- Inspecter selon un schéma non périodique établi à partir d'un quantile α :
$$T_{i+1} = \sup\{T_i + j\Delta t : R_{T_i+j\Delta t} \geq \alpha\},$$
 ($R_{T_i+j\Delta t}$ actualisé selon la mesure)
- Si panne à T_i , remplacer correctivement,
- Si non, reconstruire \hat{x}_{T_i} et prendre une décision selon un seuil de dégradation M ,
- Si $\hat{x}_{T_i} \geq M$, remplacer préventivement à T_i ,
- Si $\hat{x}_{T_i} < M$, ne rien faire et renvoyer la même démarche de décision à T_{i+1} ,
- Variables à optimiser: T_{i+1} (en ligne) et α , M (hors ligne).

Politique Q-I/R (conditionnelle et dynamique) (2)

Optimisation en ligne (T_{i+1})



Optimisation hors ligne (α et M)



$C = 0.0047, n = 0.35, \beta = 3.9, \sigma_\omega^2 = 4.8326, \Delta t = 1, \beta_0 = 0.06, \beta_1 = 1.25,$
 $\sigma_v^2 = 0.0625, d = 6, N = 4000, N_s = 3000, C_p = 50, C_c = 100$ and $C_d = 250$

Politique de maintenance non dynamiques (références)

Politique P-I/R (conditionnelle et non dynamique)

- Règles de décision sont similaire à celui de politique Q-I/R sauf que le schéma d'inspection est périodique (période d'inter-inspection T),
- Variables à optimiser: T , M (hors ligne).

Politique B-R (non conditionnelle et non dynamique)

- Remplacer (soit préventivement soit correctivement) à chaque période T ,
- Variable à optimiser: T (hors ligne).

Comparaison sur la structure de maintenance

Sommaire des politiques de maintenance

Politique	Type de remplacement préventif	Date de remplacement		Date d'inspection
		Préventif	Correctif	
D-M	Basé sur le temps	Dynamique	Dépendant	Non dynamique
Q-I/R	Conditionnel	Dynamique	Dynamique	Dynamique
B-R	Basé sur le temps	Non dynamique	Non dynamique	\emptyset
P-I/R	Conditionnel	Non dynamique	Non dynamique	Non dynamique

Politique	Optimisation en ligne		Optimisation hors ligne	
	Paramètres	Critères	Paramètres	Critères
D-M	$T_{pred}^{(i)}$	Coût C_{pred}	T	Coût C^∞
Q-I/R	T_{i+1}	Fiabilité sur (T_i, T_{i+1})	α, M	Coût C^∞
B-R	\emptyset	\emptyset	T	Coût C^∞
P-I/R	\emptyset	\emptyset	T, M	Coût C^∞

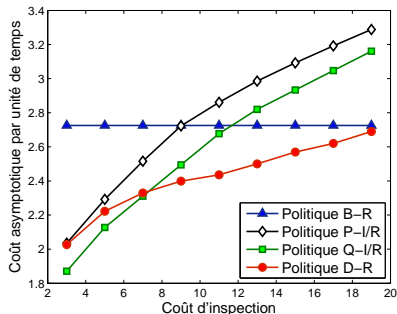
- Aspect conditionnel: la nature des actions de maintenance dépend de l'état courant du système
- Aspect dynamique: les dates des actions de maintenance dépendent de l'état courant du système

Comparaison sur le critère économique (1)

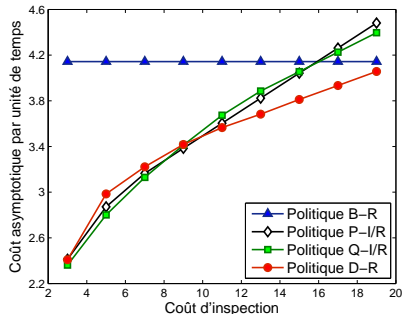
Résultats numérique - Coût d'inspection variable

$n = 0.35$, $\beta = 3.9$, $\Delta t = 1$, $\beta_0 = 0.06$, $\beta_1 = 1.25$, $\sigma_v^2 = 0.0625$, $d = 6$, $N = 4000$,
 $N_s = 3000$, $C_p = 50$, $C_c = 100$, $C_d = 250$ and $C_i = 3 : 2 : 19$

$C = 0.015$, $\sigma_\omega^2 = 2.53$ - Variance faible



$C = 0.0047$, $\sigma_\omega^2 = 4.8326$ - Variance forte

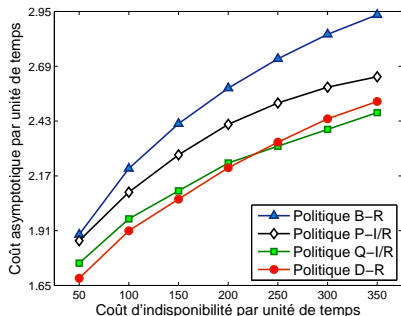


Comparaison sur le critère économique (2)

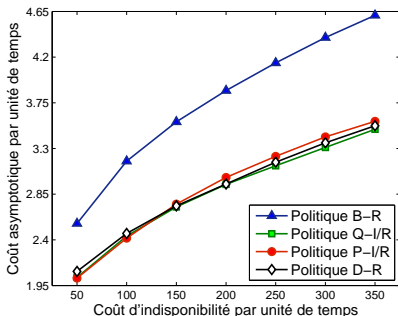
Résultats numérique - Coût d'indisponibilité par unité de temps variable

$n = 0.35$, $\beta = 3.9$, $\Delta t = 1$, $\beta_0 = 0.06$, $\beta_1 = 1.25$, $\sigma_v^2 = 0.0625$, $d = 6$, $N = 4000$,
 $N_s = 3000$, $C_p = 50$, $C_c = 100$, $C_i = 7$ and $C_d = 50 : 50 : 350$

$C = 0.015$, $\sigma_w^2 = 2.53$ - Variance faible



$C = 0.0047$, $\sigma_w^2 = 4.8326$ - Variance forte



Conclusions

Conclusions

- Considérer un modèle de dégradation et surveillance indirecte
- Proposer une méthode d'estimation de l'état en ligne utilisant le filtrage particulière
- Proposer 2 structures dynamiques de décision en maintenance: politique D-R et politique Q-I/R
- Structure de maintenance dynamique est rentable et notamment approprié d'un système dont le comportement est assez stable

Merci de votre attention!

QUESTIONS?