Prise en compte des facteurs environnementaux pour l'optimisation de la maintenance conditionnelle

Estelle DELOUX

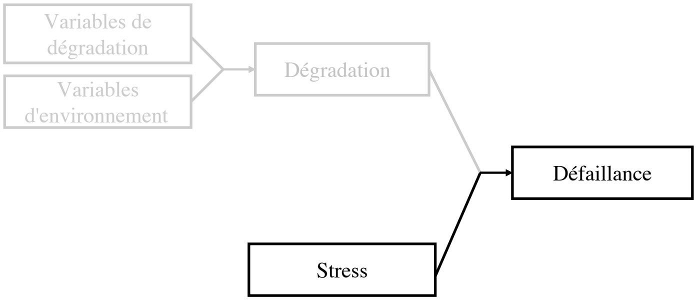
Groupe de travail Fiabilité et domaines connexes

Vendredi 24 avril 2009

Plan de l'exposé

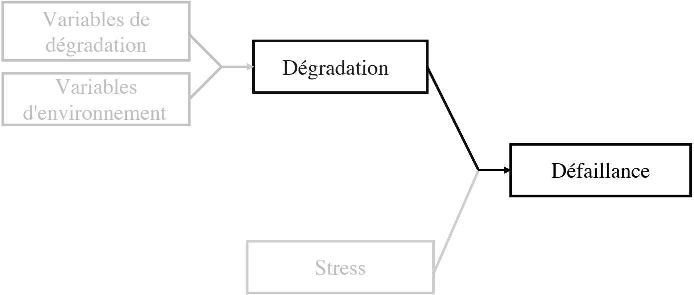
Plan de l'exposé

Cadre de l'étude



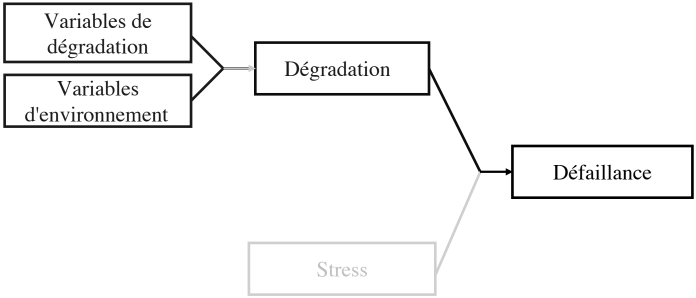
- Approches classiques (distribution de probabilité - modèles de durée de vie).
- Modèles de hasard cumulé (proportionnel).

Cadre de l'étude



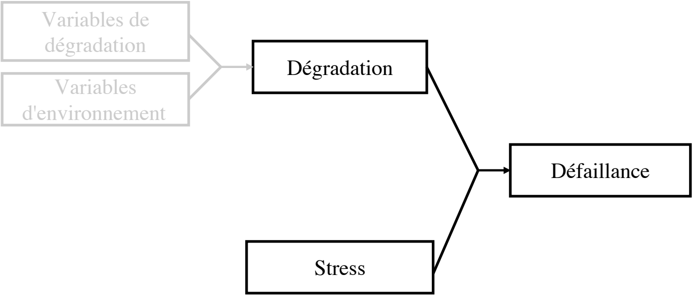
- Modèles de dégradation cumulée (chaînes de Markov, processus stochastique, . . .)

Cadre de l'étude



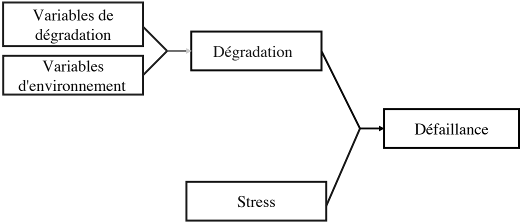
- Modèles de dégradation cumulée prenant en compte les covariables.

Cadre de l'étude



- Modèles résistance-contrainte
- Modèles de choc
- Modèles à risques concurrents
- Modèles à hasard proportionnel
- Modèles multiplicatifs
- Modèles de durée de vie accélérée

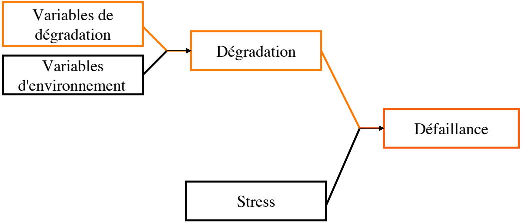
Cadre de l'étude



En général règles de maintenance reposent :

- paramètres bien identifiés (durées de vie, niveau de corrosion, . . .) ;
- prise en compte des caractéristiques stationnaires (moyenne, . . .).

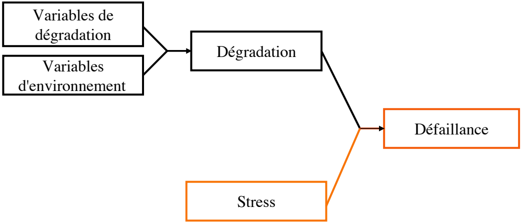
Cadre de l'étude



En général règles de maintenance reposent :

- paramètres bien identifiés (durées de vie, niveau de corrosion, ...) ;
- prise en compte des caractéristiques stationnaires (moyenne, ...).

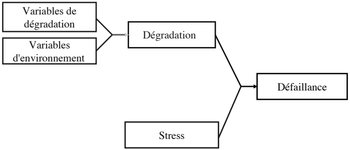
Cadre de l'étude



En général règles de maintenance reposent :

- paramètres bien identifiés (durées de vie, niveau de corrosion, . . .) ;
- prise en compte des caractéristiques stationnaires (moyenne, . . .).

Cadre de l'étude



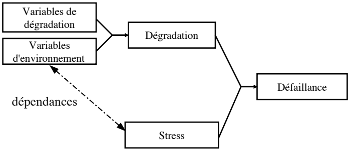
En général règles de maintenance reposent :

- paramètres bien identifiés (durées de vie, niveau de corrosion, . . .) ;
- prise en compte des caractéristiques stationnaires (moyenne, . . .).

Alors qu'en pratique :

- mécanismes de dégradation rarement connus parfaitement et soumis à de fortes évolutions ;
- prise en compte des seules caractéristiques stationnaires insuffisante.

Cadre de l'étude



En général règles de maintenance reposent :

- paramètres bien identifiés (durées de vie, niveau de corrosion, . . .) ;
- prise en compte des caractéristiques stationnaires (moyenne, . . .).

Alors qu'en pratique :

- mécanismes de dégradation rarement connus parfaitement et soumis à de fortes évolutions ;
- prise en compte des seules caractéristiques stationnaires insuffisante.

$\hookrightarrow$ Prise en compte du stress environnant.

Objectifs

- Utiliser les modèles fiabilistes en maintenance, modèles de défaillance prenant en compte :
  - la dégradation ;
  - l'environnement aléatoire stressant.

Objectifs

- Utiliser les modèles fiabilistes en maintenance, modèles de défaillance prenant en compte :
  - la dégradation ;
  - l'environnement aléatoire stressant.

- Développer des politiques de maintenance adaptées au niveau d'information disponible sur le système.

Plan de l'exposé

Modélisation de dépendances mutuelles

Objectif

Modélisation et évaluation d'une politique de maintenance pour un système présentant des dépendances mutuelles entre le processus de dégradation et le stress.

Données du problème

Un mode de défaillance :

- la dégradation ;

fonction de deux variables :

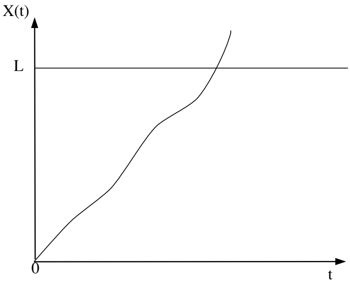
- le niveau de dégradation X_t ;
- la variable de stress Y_t.

Les variables d'états

- Z_t : état du système ; $Z_t = 1$ si défaillance, $Z_t = 0$ sinon.
- X_t : niveau de dégradation du système : modélisé par un processus gamma.

Les variables d'états

- Z_t : état du système ; $Z_t = 1$ si défaillance, $Z_t = 0$ sinon.
- X_t : niveau de dégradation du système : modélisé par un processus gamma.

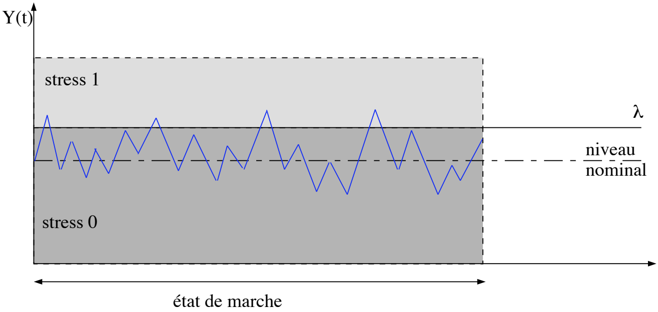


Les variables d'états

- Z_t : état du système ; $Z_t = 1$ si défaillance, $Z_t = 0$ sinon.
- X_t : niveau de dégradation du système : modélisé par un processus gamma.
- Y_t : variable de stress $\Rightarrow$ indicateur et cause de défaillance : modélisé par :
  - avant défaillance : un processus gaussien ;
  - après défaillance : un mouvement brownien général.

Intensité du stress : indicateur de défaillance

Y_t : intensité du stress.

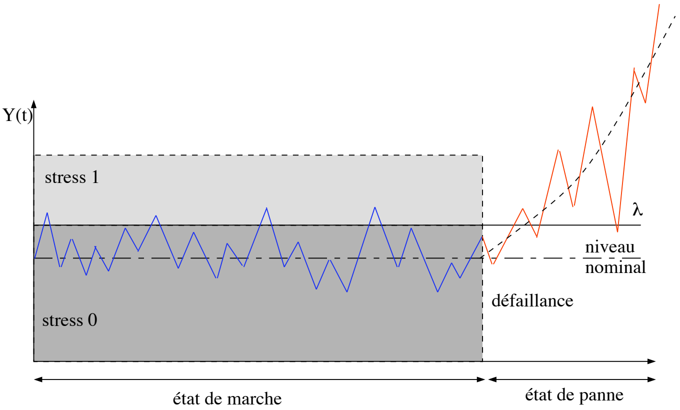


Modélisation de l'intensité du stress avant défaillance :

$$\Delta Y \sim N(m, \sigma^2)$$

Intensité du stress : indicateur de défaillance

Y_t : intensité du stress.



Modélisation de l'intensité du stress après défaillance :

$$\Delta Y \sim N(m + \mu t_{Tdef}, \sigma^2)$$

Influence de Y_t sur la dégradation

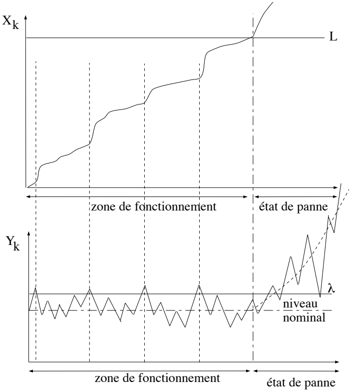
- *Pas d'impact :* Impact non mesurable.

Influence de Y_t sur la dégradation

- *Pas d'impact.*
- *Impact ponctuel :* Si $Y_t > \lambda$ (λ : seuil prédéterminé) $\Rightarrow$ le système est “stressé” et la vitesse moyenne de dégradation augmente.

Influence de Y_t sur la dégradation

- *Pas d'impact.*
- *Impact ponctuel :* Si $Y_t > \lambda$ (λ : seuil prédéterminé) $\Rightarrow$ le système est "stressé" et la vitesse moyenne de dégradation augmente.

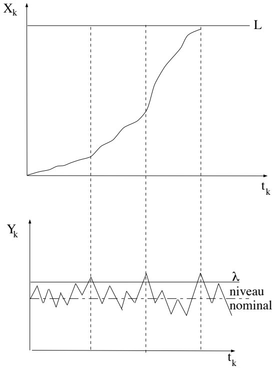


Influence de Y_t sur la dégradation

- *Pas d'impact.*
- *Impact ponctuel.*
- *Impact permanent :* la vitesse moyenne de dégradation augmente irréversiblement à chaque fois que le système est "stressé".

Influence de Y_t sur la dégradation

- *Pas d'impact.*
- *Impact ponctuel.*
- *Impact permanent :* la vitesse moyenne de dégradation augmente irréversiblement à chaque fois que le système est "stressé".



Fiabilité

- Dans le cas “pas d’impact” :

$$R(i\Delta t) = \int_0^L \frac{\beta^{\alpha i}}{\Gamma(\alpha i)} x^{\alpha i - 1} e^{-\beta x} dx$$

Fiabilité

- Dans le cas “pas d'impact” :

$$R(i\Delta t) = \int_0^L \frac{\beta^{\alpha i}}{\Gamma(\alpha i)} x^{\alpha i - 1} e^{-\beta x} dx$$

- Dans le cas “impact ponctuel” :

$$R(i\Delta t) = \sum_{j=0}^{i} C_i^j p^j (1-p)^{(i-j)} \int_0^L \frac{\beta^{(\alpha i + \alpha'(i-j))\Delta t}}{\Gamma((\alpha i + \alpha'(i-j))\Delta t)} x^{(\alpha i + \alpha'(i-j))\Delta t} e^{-\beta x} dx$$

Fiabilité

- Dans le cas “pas d'impact” :

$$R(i\Delta t) = \int_0^L \frac{\beta^{\alpha i}}{\Gamma(\alpha i)} x^{\alpha i - 1} e^{-\beta x} dx$$

- Dans le cas “impact ponctuel” :

$$R(i\Delta t) = \sum_{j=0}^{i} C_i^j p^j (1-p)^{(i-j)} \int_0^L \frac{\beta^{(\alpha i + \alpha'(i-j))\Delta t}}{\Gamma((\alpha i + \alpha'(i-j))\Delta t)} x^{(\alpha i + \alpha'(i-j))\Delta t} e^{-\beta x} dx$$

- Dans le cas “impact permanent” :
  Processus de dégradation non markovien, la loi va dépendre du nombre de stress et de la date de ces stress.
  Estimation du critère de coût.

Actions de maintenance disponibles

Actions de maintenance disponibles

Deux types actions :

- n'influencent pas le fonctionnement : inspections
- influencent le fonctionnement : rétablir ou améliorer le système

Actions de maintenance disponibles

Deux types actions :

- n'influencent pas le fonctionnement : inspections
  - connaissance précise de l'état du système par la mesure de X_t ;
  - connaissance de l'état du marche du système : Z_t;
- influencent le fonctionnement : rétablir ou améliorer le système

Actions de maintenance disponibles

Deux types actions :

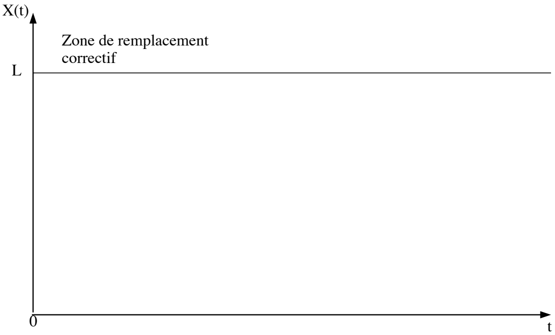
- n'influencent pas le fonctionnement : inspections
  - connaissance précise de l'état du système par la mesure de X_t ;
  - connaissance de l'état du marche du système : Z_t;
- influencent le fonctionnement : rétablir ou améliorer le système
  - remplacements préventifs ou correctifs ;

Maintenance conditionnelle pour X(t)

Objectif : prévention de la défaillance.

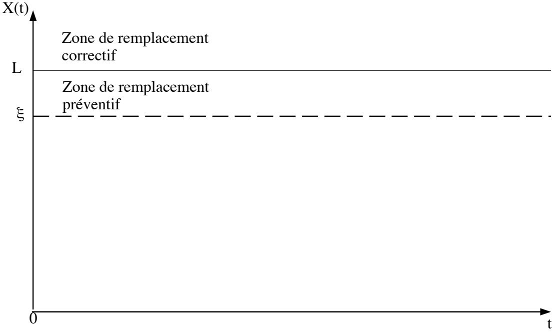
Maintenance conditionnelle pour X(t)

Objectif : prévention de la défaillance.



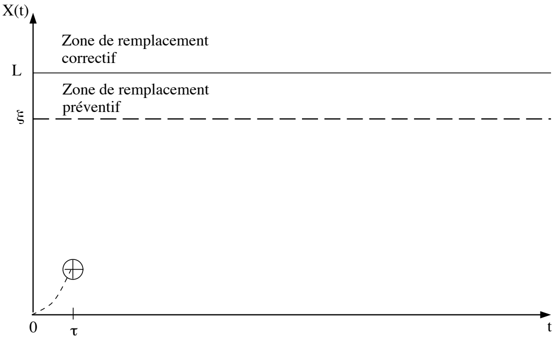
Maintenance conditionnelle pour X(t)

Objectif : prévention de la défaillance.



Maintenance conditionnelle pour X(t)

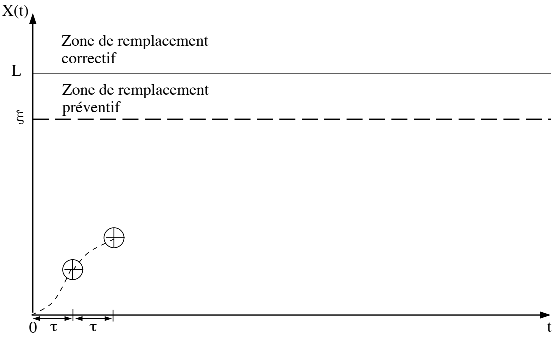
Objectif : prévention de la défaillance.



- Inspection, τ, c_{ix}.

Maintenance conditionnelle pour X(t)

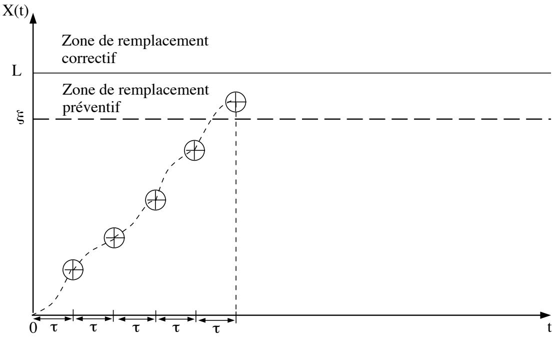
Objectif : prévention de la défaillance.



- Inspection, τ, c_{ix}.

Maintenance conditionnelle pour X(t)

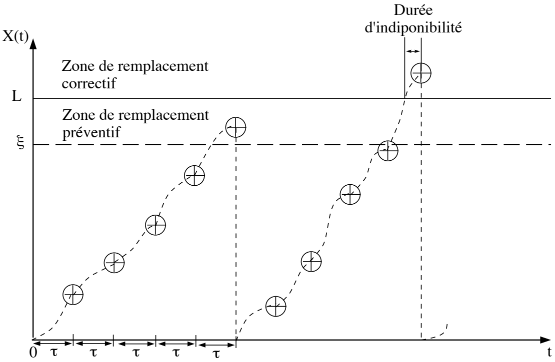
Objectif : prévention de la défaillance.



- Inspection, τ, c_{ix}.
- Remplacement préventif, $X_t \in [\xi, L]$, $c_p + c_{ix}$.

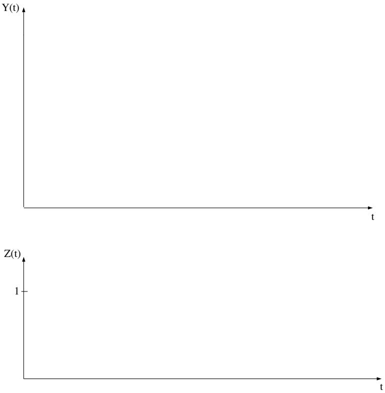
Maintenance conditionnelle pour X(t)

Objectif : prévention de la défaillance.

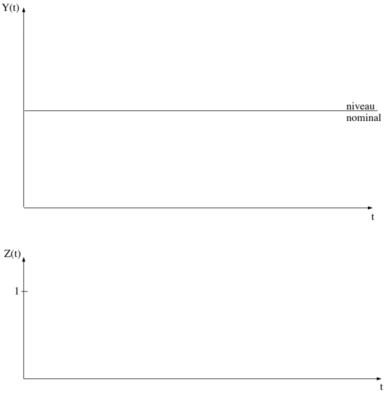


- Inspection, τ, c_{ix}.
- Remplacement préventif, $X_t \in [\xi, L]$, $c_p + c_{ix}$.
- Remplacement correctif, $X_t > L$, $c_c + c_{ix} + c_u D_u$.

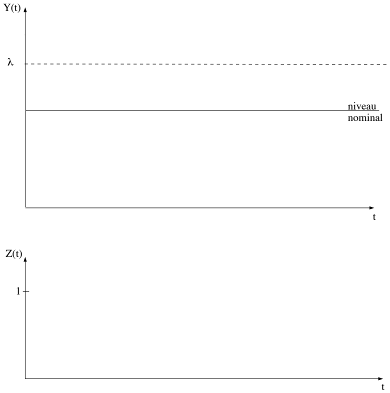
Une carte de contrôle pour Y_t



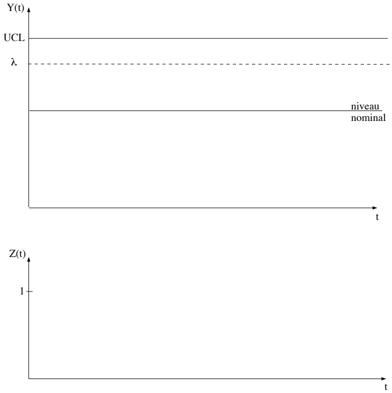
Une carte de contrôle pour Y_t



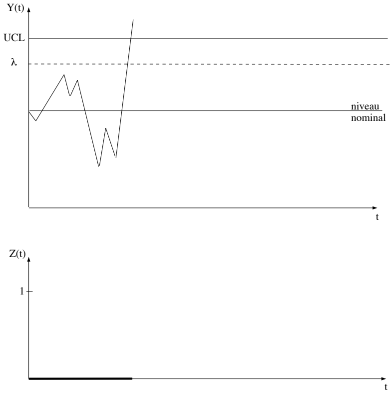
Une carte de contrôle pour Y_t



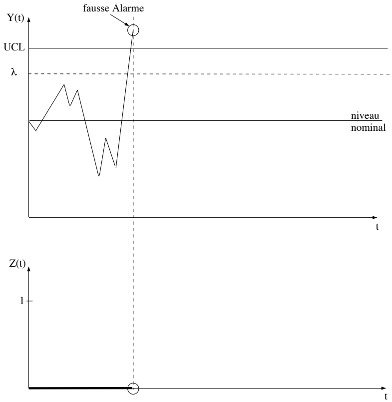
Une carte de contrôle pour Y_t



Une carte de contrôle pour Y_t

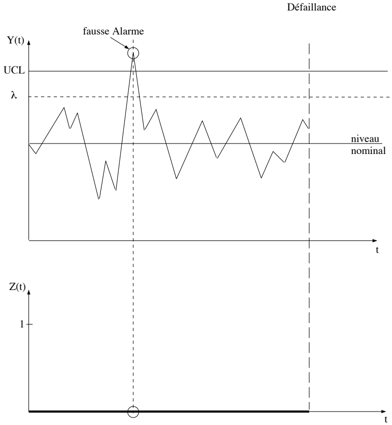


Une carte de contrôle pour Y_t



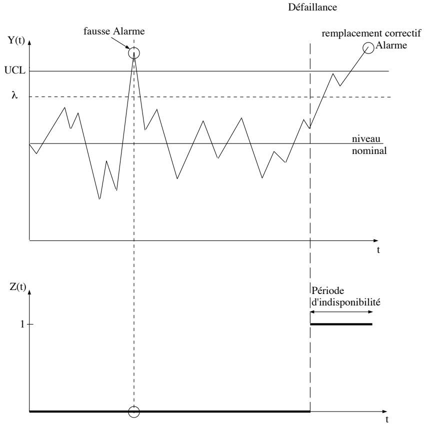
- Inspection de $Z(t)$, $Y(t) > UCL$, $c_{iz}(< c_{ix})$.

Une carte de contrôle pour Y_t

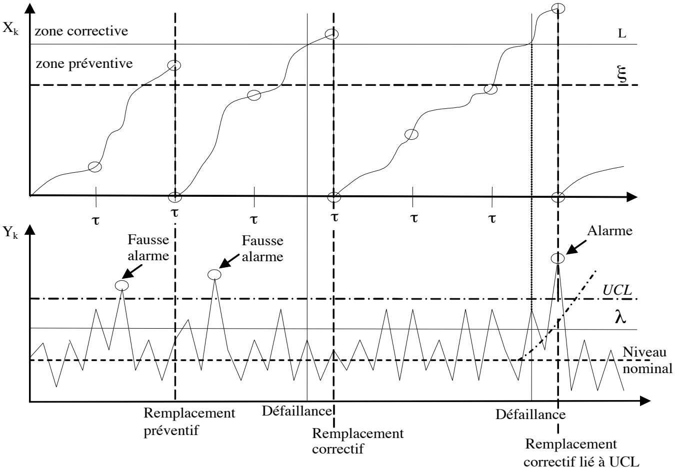


- Inspection de $Z(t)$, $Y(t) > UCL$, $c_{iz} (< c_{ix})$.

Une carte de contrôle pour Y_t



- Inspection de $Z(t)$, $Y(t) > UCL$, $c_{iz}(< c_{ix})$.
- Remplacement correctif, $Z(t) = 1$, $c_{iz} + c_c + c_u D_u$.


X_k
zone corrective
zone préventive
L
ξ
τ
τ
τ
τ
τ
τ
Y_k
Fausse alarme
Fausse alarme
Alarme
UCL
λ
Niveau nominal
Remplacement préventif
Défaillance
Remplacement correctif
Défaillance
Remplacement correctif lié à UCL

Évaluation du critère de coût

Deux hypothèses :

- hypothèse markovienne : "le futur ne dépend que du présent" ;
- hypothèse de renouvellement : "on est sûr de revenir dans un état passé".

Évaluation du critère de coût

Deux hypothèses :

- hypothèse markovienne : “le futur ne dépend que du présent” ;
- hypothèse de renouvellement : “on est sûr de revenir dans un état passé”.

$\Rightarrow$ Théorème de renouvellement.

Évaluation du critère de coût

Deux hypothèses :

- hypothèse markovienne : "le futur ne dépend que du présent" ;
- hypothèse de renouvellement : "on est sûr de revenir dans un état passé".

$\Rightarrow$ Théorème de renouvellement.

Conséquences :

- la loi d'évolution du système ne dépend que de l'observation courante ;
- on définit une notion de "cycle de renouvellement" et on utilise le fait que ce qui se passe en moyenne sur l'infini est équivalent à ce qui se passe en moyenne sur un cycle, i.e.

Évaluation du critère de coût

Deux hypothèses :

- hypothèse markovienne : "le futur ne dépend que du présent" ;
- hypothèse de renouvellement : "on est sûr de revenir dans un état passé".

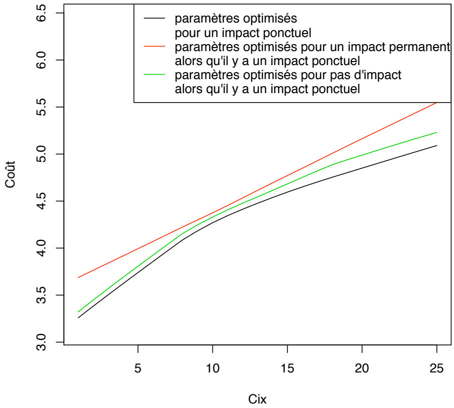
$\Rightarrow$ Théorème de renouvellement.

Conséquences :

- la loi d'évolution du système ne dépend que de l'observation courante ;
- on définit une notion de "cycle de renouvellement" et on utilise le fait que ce qui se passe en moyenne sur l'infini est équivalent à ce qui se passe en moyenne sur un cycle, i.e.

$$C_\infty(\tau, \xi, UCL, \delta|\theta) = \lim_{t\to\infty} \frac{C(t|\theta)}{t} \overset{ren.}{=} \frac{\mathbb{E}(C(S|\theta))}{\mathbb{E}(S|\theta)}$$

Influence de la connaissance de l'impact du stress



- $\tau_{\text{pas impact}} > \tau_{\text{impact ponctuel}} >> \tau_{\text{impact permanent}}$.
- Une erreur de type "impact permanent" au lieu de "impact ponctuel" est plus préjudiciable à cause de la surestimation en moyenne de la vitesse de dégradation.

Politiques de maintenance “adaptatives”

- Politique 0 : politique stationnaire basée sur les caractéristiques moyennes du système.

Politiques de maintenance “adaptatives”

- Politique 0 : politique stationnaire basée sur les caractéristiques moyennes du système.
- Politique 4 : temps inter-inspection varie en fonction du nombre de stress survenus, temps inter-inspection ré-initialisé après chaque **inspection**.

Politiques de maintenance “adaptatives”

- Politique 0 : politique stationnaire basée sur les caractéristiques moyennes du système.
- Politique 4 : temps inter-inspection varie en fonction du nombre de stress survenus, temps inter-inspection ré-initialisé après chaque **inspection**.
- Politique 5 : temps inter-inspection varie en fonction du nombre de stress survenus, temps inter-inspection ré-initialisé après chaque **remplacement**.

Résultats numériques dans le cas d'un impact ponctuel

$\delta\alpha$	politique 0		politique 4		politique 5	
	τ^*	Coût	τ_1^*	Coût	τ_2^*	Coût
0.5	17	1.461	29	1.383	33	1.349
0.6	15	1.576	24	1.548	29	1.495

- Les extensions proposées améliorent les performances obtenues avec la politique 0.
- L'intervalle inter-inspection reste toujours plus grand pour la politique 4 que pour la politique 0 $\longrightarrow$ bénéfice du schéma adaptatif.
- Politique 5 souligne le bénéfice lié aux intervalles inter-inspection décroissants.

Conclusions et perspectives

Conclusions :

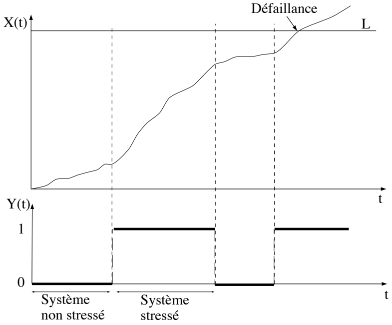
- Modèle de dégradation : dépendances mutuelles entre dégradation et stress.
- Construction de politiques “adaptatives” basées sur le nombre de sollicitations observées.
- Illustration des bénéfices engendrés par la capture de toute nouvelle information dans le modèle de décision en maintenance.

Perspectives :

- Modélisation du stress en temps continu.

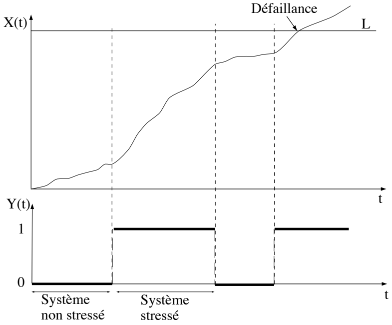
Modélisation du stress

- Temps passé dans l'état non stressé $T_0 \sim Exp(\lambda_0 e^{-\lambda_0 t})$.
- Temps passé dans l'état stressé $T_1 \sim Exp(\lambda_1 e^{-\lambda_1 t})$.



Modélisation du stress

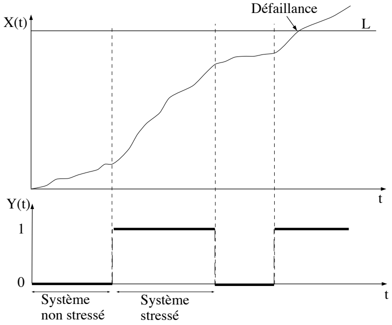
- Temps passé dans l'état non stressé $T_0 \sim Exp(\lambda_0 e^{-\lambda_0 t})$.
- Temps passé dans l'état stressé $T_1 \sim Exp(\lambda_1 e^{-\lambda_1 t})$.



Système non stressé $\rightarrow X(t-s) \sim \Gamma(\alpha_0(t-s), \beta)$.

Modélisation du stress

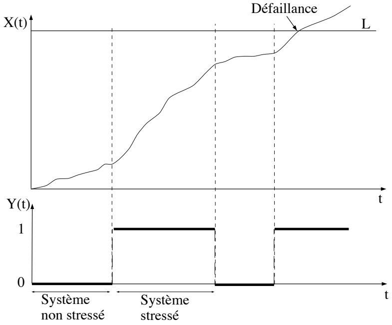
- Temps passé dans l'état non stressé $T_0 \sim Exp(\lambda_0 e^{-\lambda_0 t})$.
- Temps passé dans l'état stressé $T_1 \sim Exp(\lambda_1 e^{-\lambda_1 t})$.



Système non stressé $\rightarrow X(t-s) \sim \Gamma(\alpha_0(t-s), \beta)$.
Système stressé : accélération de la vitesse de dégradation par un facteur e^{γ}.

Modélisation du stress

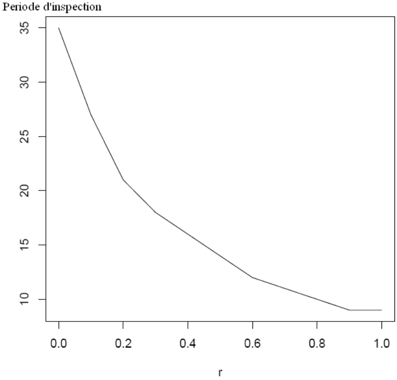
- Temps passé dans l'état non stressé $T_0 \sim Exp(\lambda_0 e^{-\lambda_0 t})$.
- Temps passé dans l'état stressé $T_1 \sim Exp(\lambda_1 e^{-\lambda_1 t})$.



Système non stressé $\longrightarrow X(t-s) \sim \Gamma(\alpha_0(t-s), \beta)$.
Système stressé : accélération de la vitesse de dégradation par un facteur e^{γ}.
En général $\longrightarrow X(t-s) \sim \Gamma(\alpha_0(t-s)e^{\gamma Y(t-s)}, \beta)$.

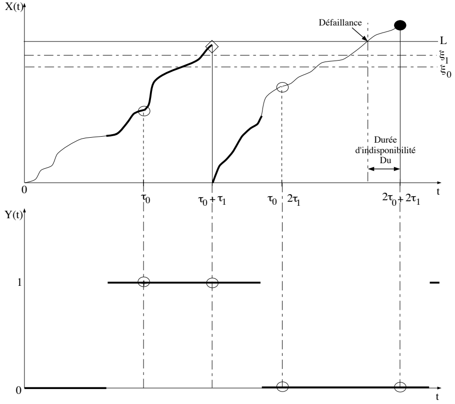
Politiques de maintenance

- Politique "stationnaire" : basée sur les caractéristiques moyennes du système dont le temps moyen passé dans l'état stressé.



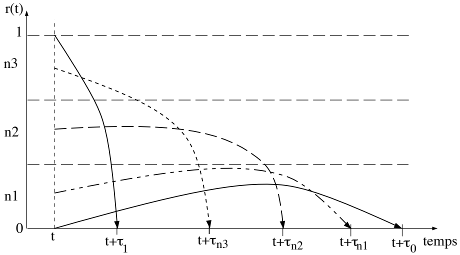
Politiques de maintenance

- Politiques "adaptatives" :
  - Permutations entre politiques de maintenance extrêmes :
    - (τ_0, ξ_0) paramètres de décision si système jamais stressé ;
    - (τ_1, ξ_1) paramètres de décision si système toujours stressé.

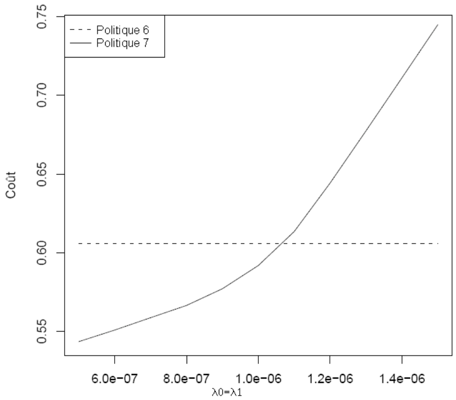


Politiques de maintenance

- Evolution continue de la politique en fonction de l'information disponible sur le stress : $(\tau_{r(t)}, \xi_{r(t)})$.
- Politique de type seuils :

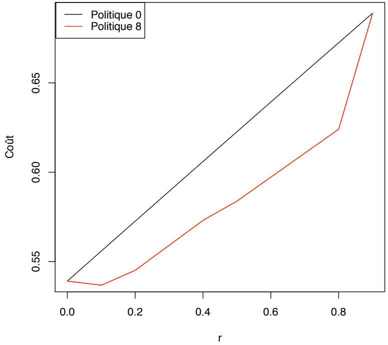


Politique stationnaire versus politique des permutations



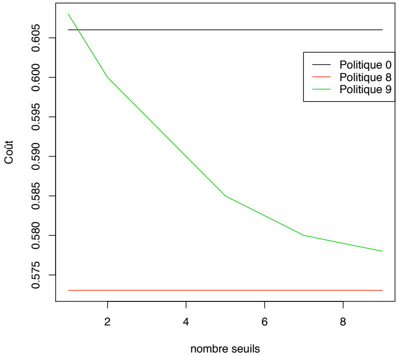
Politique des permutations (politique 7) minimise le critère de coût uniquement lorsque le temps passé dans un état est relativement long.

Politique stationnaire versus politique intégrant continuellement l'information sur le stress



- Politique 8 $\longrightarrow$ minimise toujours le critère de coût.
- Avantage politique 8 : proposition d'un schéma d'inspections et de seuils de remplacement préventifs qui s'adapte à la proportion de temps passé dans l'état stressé.

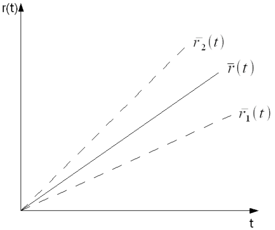
Politique stationnaire versus politique des seuils



- Nécessaire d'optimiser le nombre de seuils :
  - Si nombre de seuils trop faible : politique des seuils pas pertinente.
  - Si nombre de seuils élevé : politique des seuils temps vers politique 8 mais difficulté de mise en place.

Conclusions

- Intégration de l'information sur le stress permet de réduire le critère de coût.
- Intégration du stress pas toujours évidente.
- La difficulté d'implémentation est proportionnelle au niveau de connaissance.



$r(t)$ mesuré continuellement, règles de décision :

- inspection τ unités de temps plus tard si $\forall k \in [t, t+\tau_1 - 1]; r_1(k) < r(k) < r_2(k)$
- inspection τ_1 unités de temps plus tard si pour un k donné $\forall k \in [t, t+\tau_1 - 1]; \bar{r}_1(k) \geq r(k)$
- inspection τ_2 unités de temps plus tard si pour un k donné $\forall k \in [t, t+\tau_1 - 1]; r(k) \leq \bar{r}_2(k)$

Résultats actuels par simulation :

- $l1 = 1, l2 = 2 \ \rightarrow \xi = 1, \tau = 34$ coût$= 0.564$
- $l1 = 1, l2 = 1.727273 \ \rightarrow \xi = 1, \tau = 33$ coût$= 0.5690$
- $l1 = 1, l2 = 2.333333 \ \rightarrow \xi = 1, \tau = 35$ coût$= 0.558$

Avec la politique non stationnaire : coût$= 0.556$

Évaluation du critère de coût

Deux hypothèses :

- à la date d'un remplacement le processus est égale à 0 et l'évolution future de ce processus aléatoire ne dépend pas du passé
  $\hookrightarrow (X_t, Y_t)_{t\geq 0}$ = processus régénératif
  instants de régénération = dates de remplacement du système
- l'évolution du système dépend seulement de son état aux dates d'inspections
  $\hookrightarrow (X_t, Y_t)_{t\geq 0}$ = processus semi-régénératif
  instants de régénération = dates d'inspections

Evaluation de la loi stationnaire

Expression de la loi stationnaire dans le cas d'une politique de maintenance stationnaire :

$$\Pi(y) = \int_{xi}^{+\infty} \Pi(x) dx f^{(\tau)}(y) + \int_{0}^{\xi} \Pi(x) f^{(\tau)}(y-x) dx$$

avec

$$f^{(\tau)}(y) = \frac{1}{\Gamma(\alpha(\tau + r(t)e^{\gamma}))} \beta^{\alpha(\tau+r(t)e^{\gamma})} x^{\alpha(\tau+r(t)e^{\gamma})-1} e^{\beta x}$$

$r(t) \sim$ loi k-erlang ($\lambda_r = \frac{\lambda_0+\lambda_1}{\lambda_0}$)

Evaluation de la loi stationnaire

Scénarios : 6 scénarios exclusifs :
instants de semi-régénération=dates d'inspections (avant un remplacement éventuel)

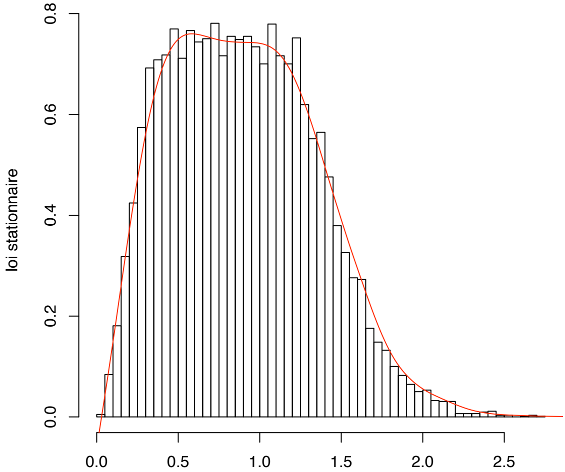
- Scénario 1 : $t = 0$ $X \geq \xi$
  - Scénario 1-1 : inspection à τ
  - Scénario 1-2 : inspection à τ_1
  - Scénario 1-3 : inspection à τ_2
- Scénario 2 : $t = 0$ $X < \xi$
  - Scénario 2-1 : inspection à τ
  - Scénario 2-2 : inspection à τ_1
  - Scénario 2-3 : inspection à τ_2

Evaluation de la loi stationnaire

Expression de la loi stationnaire dans le cas de la politique de maintenance adaptative :

$$
\begin{aligned}
\Pi(y) = \int_{xi}^{+\infty} \Pi(x)dx \quad & \Big[f^{(\tau)}(y)(e^{-\lambda_r l_1} - e^{-\lambda_r l_2})^{\tau_1 - 1} \\
& + f^{(\tau_1)}(y) e^{-\lambda_r l_2} \sum_{i=1}^{\tau_1 - 2} (e^{-\lambda_r l_1} - e^{-\lambda_r l_2})^i \\
& + f^{(\tau_2)}(y)(1 - e^{-\lambda_r l_1}) \sum_{i=1}^{\tau_1 - 2} (e^{-\lambda_r l_1} - e^{-\lambda_r l_2})^i \Big] \\
+ \int_0^{\xi} \Pi(x) \quad & \Big[f^{(\tau)}(y-x)(e^{-\lambda_r l_1} - e^{-\lambda_r l_2})^{\tau_1 - 1} \\
& + f^{(\tau_1)}(y-x) e^{-\lambda_r l_2} \sum_{i=1}^{\tau_1 - 2} (e^{-\lambda_r l_1} - e^{-\lambda_r l_2})^i \\
& + f^{(\tau_2)}(y-x)(1 - e^{-\lambda_r l_1}) \sum_{i=1}^{\tau_1 - 2} (e^{-\lambda_r l_1} - e^{-\lambda_r l_2})^i \Big] dx
\end{aligned}
$$

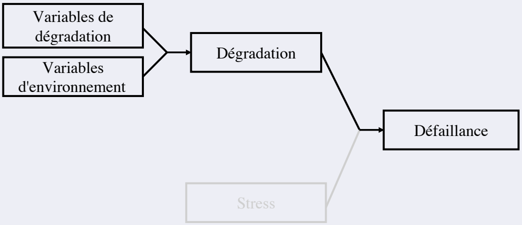
Loi stationnaire



Plan de l'exposé

Conclusion générale

Conclusion générale :



- Modèle de défaillance : prise en compte du stress.
  - Un système avec un seul mode de défaillance mais une dépendance entre variables de dégradation et stress.

Conclusion générale :

- Modèle de défaillance : prise en compte du stress.
- Construction et évaluation de politiques de maintenance :
  - Combinaison de la maintenance conditionnelle et de la surveillance des procédés **dans le cadre d'un système à dégradation continue**.
  - Politiques adaptatives fonction du nombre de sollicitations au stress lorsque :
    - la mesure du stress en ligne est disponible ;
    - la nature de l'impact du stress(nul ou non mesurable, ponctuel, permanent) est connue.

Conclusion générale :

- Modèle de défaillance : prise en compte du stress.
- Construction et évaluation de politiques de maintenance :
  - Combinaison de la maintenance conditionnelle et de la surveillance des procédés **dans le cadre d'un système à dégradation continue**.
  - Politiques adaptatives fonction du nombre de sollicitations au stress lorsque :
    - la mesure du stress en ligne est disponible ;
    - la nature de l'impact du stress(nul ou non mesurable, ponctuel, permanent) est connue.
- Illustration des performances économiques de chacun des modèles.

Conclusions et perspectives

Perspectives :

- Renforcer les résultats présentés dans la deuxième partie.
- Prise en compte de facteurs influençant les actions de maintenance :
  - la disponibilité des ressources (ressources humaines, matérielles).
  - les différents modes d'exploitation.
  - etc.
- Niveau de dégradation rarement observable directement $\Longrightarrow$ développer des modèles de maintenance basés sur une information partielle imparfaite.