

Politiques de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant

Estelle DELOUX

Soutenance de thèse

sous la direction de: Bruno CASTANIER & Christophe BÉRENGUER

Laboratoire: Institut de Recherche en Communications et en Cybernétique de Nantes (IRCCyN)

Equipe: Systèmes Logistiques et de Production (SLP)

Mardi 7 octobre 2008

Plan de l'exposé

- 1 Contexte des travaux
- 2 Modélisation du système et de la maintenance
- 3 Extensions du modèle de maintenance
- 4 Conclusions et perspectives

Plan de l'exposé

- 1 Contexte des travaux
 - Introduction de la problématique
 - Description des objectifs
- 2 Modélisation du système et de la maintenance
 - Description et modélisation du système
 - Politique de maintenance
 - Performance économique
 - Conclusions et perspectives
- 3 Extensions du modèle de maintenance
 - Intégration de dépendances mutuelles
 - Politique de maintenance stationnaire
 - Politiques de maintenance adaptatives
 - Modélisation continue du stress
- 4 Conclusions et perspectives

Contexte des travaux

Contexte des travaux

Problématique générale : stratégie de maintenance pour définir “*que* et *quand* faire de la maintenance” pour :

- prévenir ;
- éviter ;
- corriger ;

les dysfonctionnements multiples et aléatoires.

Contexte des travaux

Problématique générale : stratégie de maintenance pour définir “*que* et *quand* faire de la maintenance” pour :

- prévenir ;
- éviter ;
- corriger ;

les dysfonctionnements multiples et aléatoires.

Afin de :

- réduire les coûts ;

Contexte des travaux

Problématique générale : stratégie de maintenance pour définir “*que* et *quand* faire de la maintenance” pour :

- prévenir ;
- éviter ;
- corriger ;

les dysfonctionnements multiples et aléatoires.

Afin de :

- réduire les coûts ;
- maximiser la durée de fonctionnement ;

Contexte des travaux

Problématique générale : stratégie de maintenance pour définir “*que* et *quand* faire de la maintenance” pour :

- prévenir ;
- éviter ;
- corriger ;

les dysfonctionnements multiples et aléatoires.

Afin de :

- réduire les coûts ;
- maximiser la durée de fonctionnement ;
- augmenter la sécurité

Différents types de maintenance

- Maintenance corrective :

Différents types de maintenance

- Maintenance corrective :

- Maintenance préventive :

Différents types de maintenance

- Maintenance corrective :
 - Maintenance curative : permanentes.
 - Maintenance palliative : provisoires.

- Maintenance préventive :

Différents types de maintenance

- Maintenance corrective :
 - Maintenance curative : permanentes.
 - Maintenance palliative : provisoires.
- Maintenance préventive :
 - Basée sur l'âge ou le temps (durées de vie).
 - Basée sur l'état du système :

Différents types de maintenance

- Maintenance corrective :
 - Maintenance curative : permanentes.
 - Maintenance palliative : provisoires.
- Maintenance préventive :
 - Basée sur l'âge ou le temps (durées de vie).
 - Basée sur l'état du système :
 - Plus performante que les maintenances basées sur l'âge.
 - Effort de modélisation plus conséquent (modèles + données) .
 - Pas toujours possible.

Différents types de maintenance

- Maintenance corrective :
 - Maintenance curative : permanentes.
 - Maintenance palliative : provisoires.

- Maintenance préventive :
 - Basée sur l'âge ou le temps (durées de vie).
 - Basée sur l'état du système :
 - **Plus performante** que les maintenances basées sur l'âge.
 - Effort de modélisation plus conséquent (**modèles + données**).
 - Pas toujours possible.

⇒ Nécessaire de bien modéliser les performances du système.

Modélisation des performances

- “Boîte blanche” :

- “Boîte noire” :

- “Boîte grise” :

Modélisation des performances

- “Boîte blanche” :
 - modèle conceptuel ;
 - description du comportement du système à un niveau de réduction donné.

- “Boîte noire” :

- “Boîte grise” :

Modélisation des performances

- “Boîte blanche” :
 - modèle conceptuel ;
 - description du comportement du système à un niveau de réduction donné.
- “Boîte noire” :
 - modèle empirique ;
 - description des relations entre variables d’entrées et de sorties ;
 - approche statistique : modèles de durée de vie.
- “Boîte grise” :

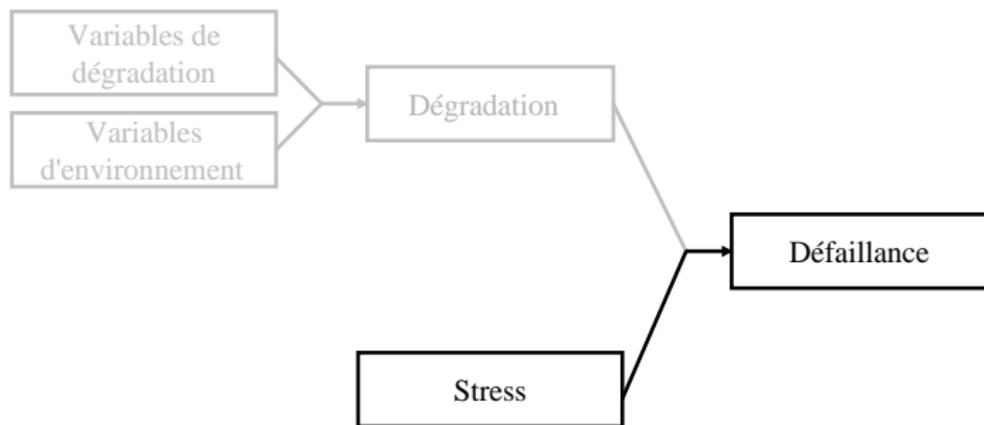
Modélisation des performances

- “Boîte blanche” :
 - modèle conceptuel ;
 - description du comportement du système à un niveau de réduction donné.
- “Boîte noire” :
 - modèle empirique ;
 - description des relations entre variables d'entrées et de sorties ;
 - approche statistique : modèles de durée de vie.
- “Boîte grise” :
 - approche stochastique ;
 - modélisation de la dégradation du système.

Modélisation des performances

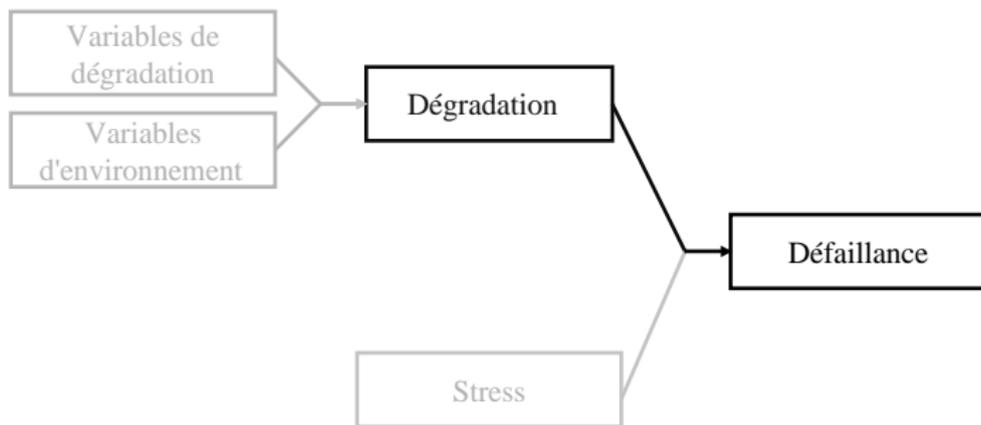
- “Boîte blanche” :
 - modèle conceptuel ;
 - description du comportement du système à un niveau de réduction donné.
- “Boîte noire” :
 - modèle empirique ;
 - description des relations entre variables d'entrées et de sorties ;
 - approche statistique : modèles de durée de vie.
- **“Boîte grise”** :
 - **approche stochastique ;**
 - **modélisation de la dégradation du système.**

Cadre de l'étude



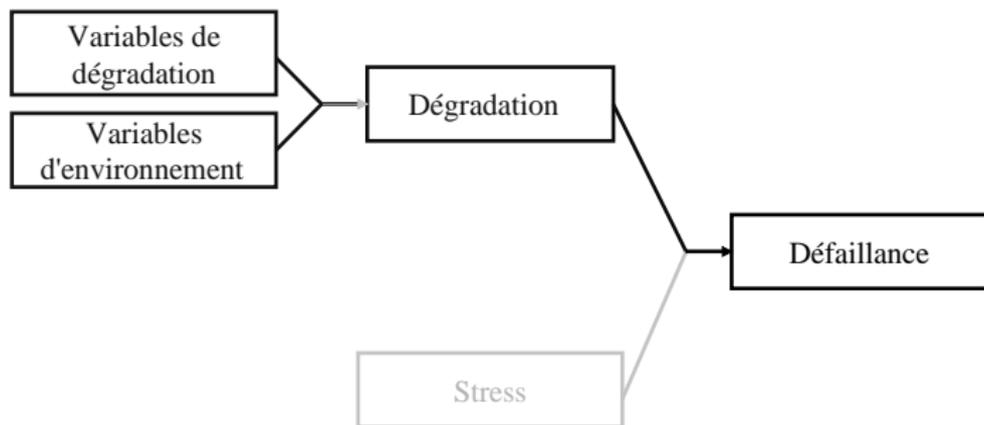
- Approches classiques (distribution de probabilité - modèles de durée de vie).
- Modèles de hasard cumulé (proportionnel).

Cadre de l'étude



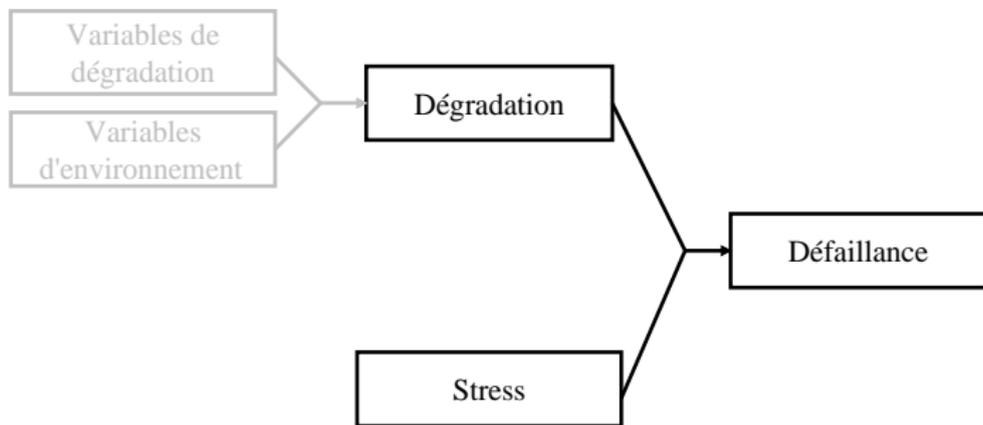
- Modèles de dégradation cumulée (chaînes de Markov, processus stochastique, ...)

Cadre de l'étude



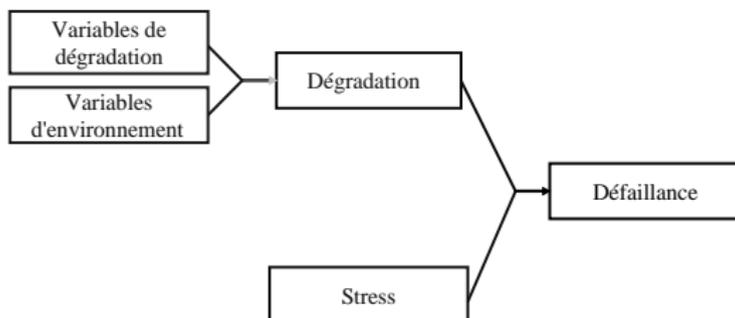
- Modèles de dégradation cumulée prenant en compte les covariables.

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

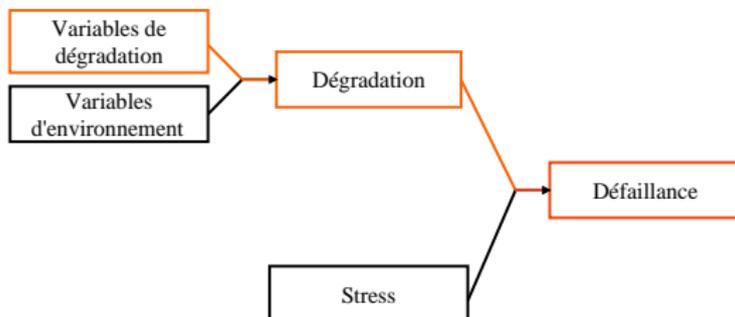
Cadre de l'étude



En général règles de maintenance reposent :

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

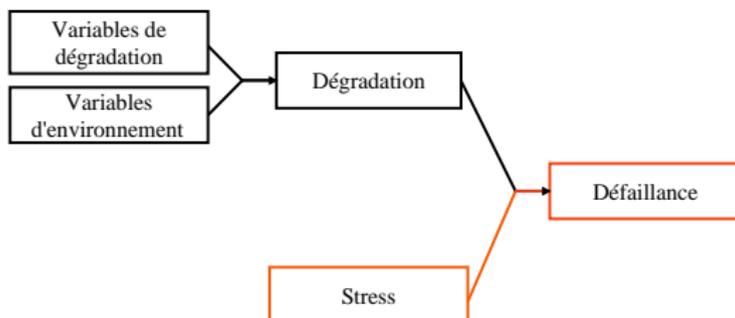
Cadre de l'étude



En général règles de maintenance reposent :

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

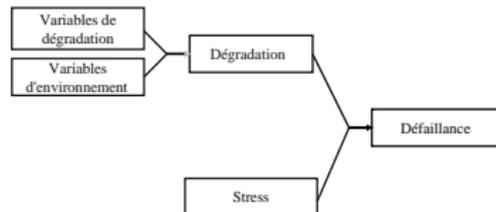
Cadre de l'étude



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



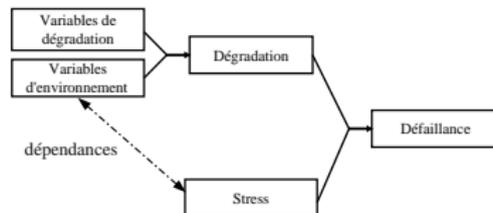
En général règles de maintenance reposent :

- 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.

↔ 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

- 1 Contexte des travaux
 - Introduction de la problématique
 - Description des objectifs
- 2 Modélisation du système et de la maintenance
 - Description et modélisation du système
 - Politique de maintenance
 - Performance économique
 - Conclusions et perspectives
- 3 Extensions du modèle de maintenance
 - Intégration de dépendances mutuelles
 - Politique de maintenance stationnaire
 - Politiques de maintenance adaptatives
 - Modélisation continue du stress
- 4 Conclusions et perspectives

Hypothèses générales

Mise en place d'un outil d'aide à la décision pour un système :

- à dégradation continue ;
- environnement stressant.

Impact du stress :

- au niveau de la dégradation ;
- au niveau de la défaillance.

Hypothèses générales

Mise en place d'un outil d'aide à la décision pour un système :

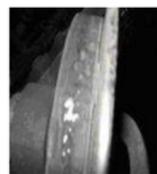
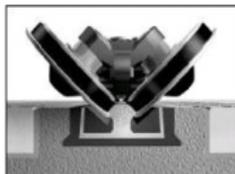
- à dégradation continue ;
- environnement stressant.

Impact du stress :

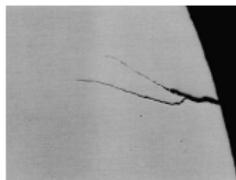
- au niveau de la dégradation ;
- **au niveau de la défaillance.**

Exemples

- galets de tramway



- roulement à bille



Modes de défaillance

- **Indicateur d'état**

- Z_t : état du système ; $Z_t = 1$ si défaillance $Z_t = 0$ sinon.

Modes de défaillance

- **Indicateur d'état**

- Z_t : état du système ; $Z_t = 1$ si défaillance $Z_t = 0$ sinon.

- **Modes de défaillance**

- *Mode de défaillance 1* : niveau excessif de détérioration.

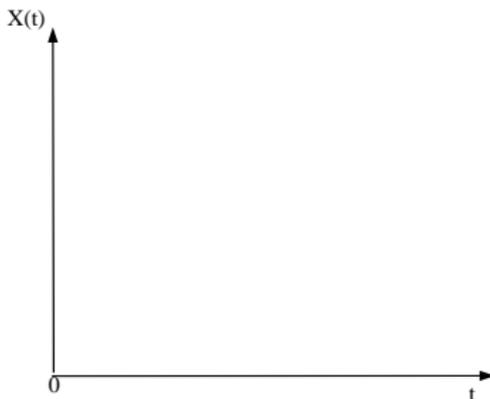
Modes de défaillance

- **Indicateur d'état**

- Z_t : état du système ; $Z_t = 1$ si défaillance $Z_t = 0$ sinon.

- **Modes de défaillance**

- *Mode de défaillance 1* : niveau excessif de détérioration.
 X_t : niveau de dégradation du système.



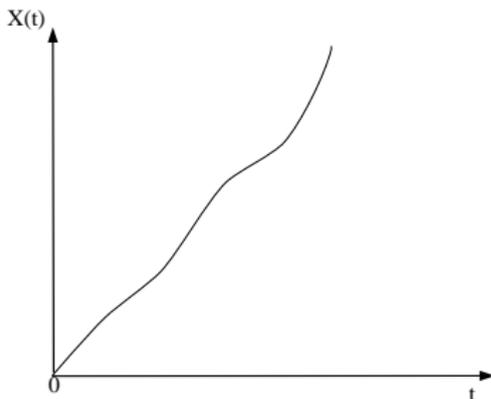
Modes de défaillance

- **Indicateur d'état**

- Z_t : état du système ; $Z_t = 1$ si défaillance $Z_t = 0$ sinon.

- **Modes de défaillance**

- *Mode de défaillance 1* : niveau excessif de détérioration.
 X_t : niveau de dégradation du système.



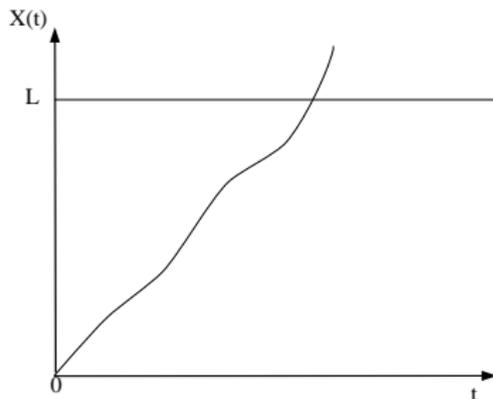
Modes de défaillance

- **Indicateur d'état**

- Z_t : état du système ; $Z_t = 1$ si défaillance $Z_t = 0$ sinon.

- **Modes de défaillance**

- *Mode de défaillance 1* : niveau excessif de détérioration.
 X_t : niveau de dégradation du système.



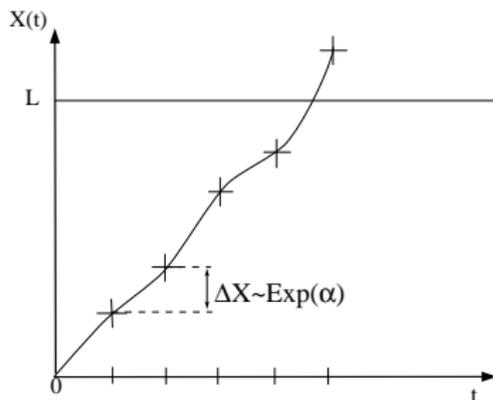
Modes de défaillance

- **Indicateur d'état**

- Z_t : état du système ; $Z_t = 1$ si défaillance $Z_t = 0$ sinon.

- **Modes de défaillance**

- *Mode de défaillance 1* : niveau excessif de détérioration.
 X_t : niveau de dégradation du système.
Modélisé par un processus de phase.



Modes de défaillance

- **Indicateur d'état**
 - Z_t : état du système ; $Z_t = 1$ si défaillance $Z_t = 0$ sinon.
- **Modes de défaillance**
 - *Mode de défaillance 1* : niveau excessif de détérioration.
 - *Mode de défaillance 2* : défaillance type choc.

Modes de défaillance

- **Indicateur d'état**

- Z_t : état du système ; $Z_t = 1$ si défaillance $Z_t = 0$ sinon.

- **Modes de défaillance**

- *Mode de défaillance 1* : niveau excessif de détérioration.
- *Mode de défaillance 2* : défaillance type choc.

Probabilité conditionnelle de défaillance par choc :
fonction de X_t et du temps :

$$P(Z_k = 1 | X_k = x < L) = 1 - e^{-ax - bt_k}$$

a, b : facteurs de tolérance du système au choc.

Modes de défaillance

- **Indicateur d'état**

- Z_t : état du système ; $Z_t = 1$ si défaillance $Z_t = 0$ sinon.

- **Modes de défaillance**

- *Mode de défaillance 1* : niveau excessif de détérioration.
- *Mode de défaillance 2* : défaillance type choc.

Probabilité conditionnelle de défaillance par choc :
fonction de X_t et **du temps** :

$$P(Z_k = 1 | X_k = x < L) = 1 - e^{-ax - bt_k}$$

a, b : facteurs de tolérance du système au choc.

Modes de défaillance

- **Indicateur d'état**

- Z_t : état du système ; $Z_t = 1$ si défaillance $Z_t = 0$ sinon.

- **Modes de défaillance**

- *Mode de défaillance 1* : niveau excessif de détérioration.
- *Mode de défaillance 2* : défaillance type choc.

Modélisation de l'impact de l'environnement stressant sur le système :

$$P(Z_k = 1 | X_k = x < L, \text{Peu stressé}) = 1 - e^{-ax - bt_k}$$

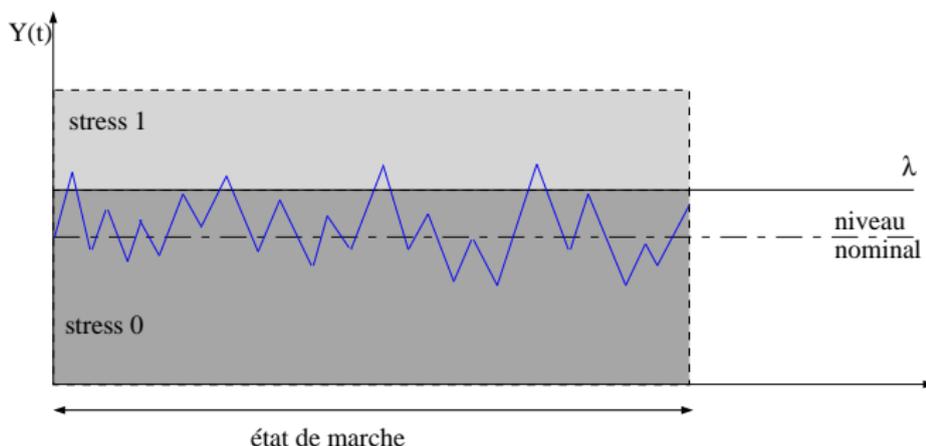
$$P(Z_k = 1 | X_k = x < L, \text{Stressé}) = 1 - F_A e^{-ax - bt_k}$$

a, b : facteurs de tolérance du système au choc.

F_A : facteur d'accélération.

Intensité du stress : indicateur de défaillance

Y_t : intensité du stress.

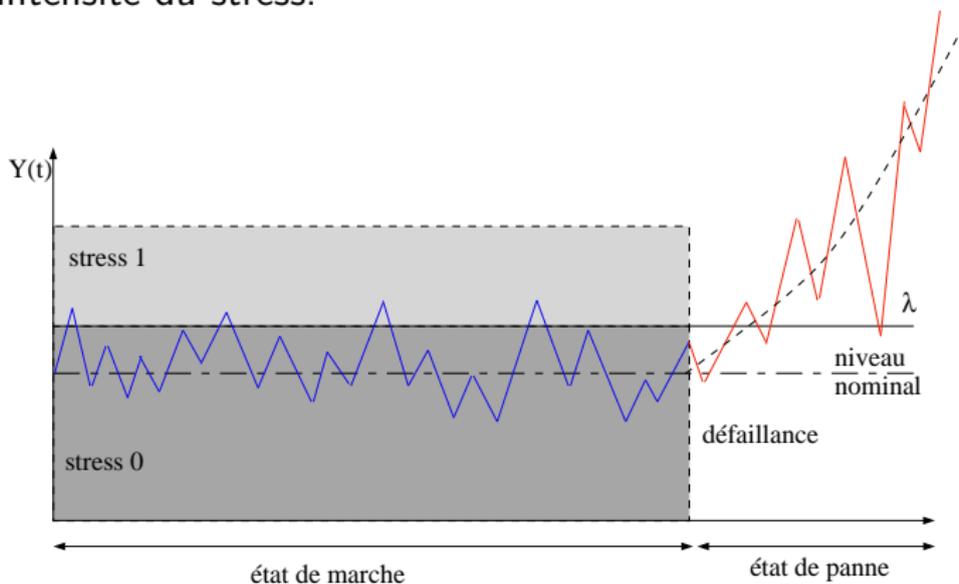


Modélisation de l'intensité du stress avant défaillance :

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

Intensité du stress : indicateur de défaillance

Y_t : intensité du stress.



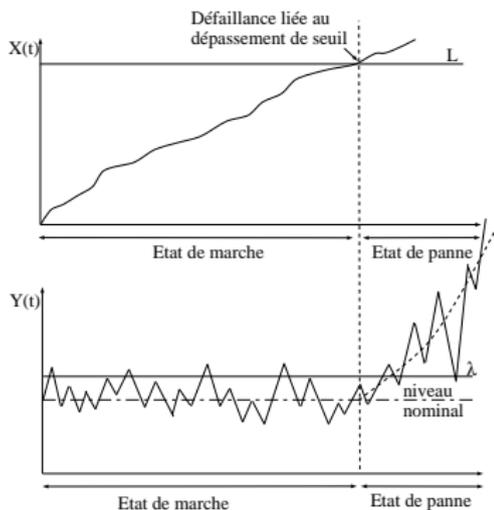
Modélisation de l'intensité du stress après défaillance :

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

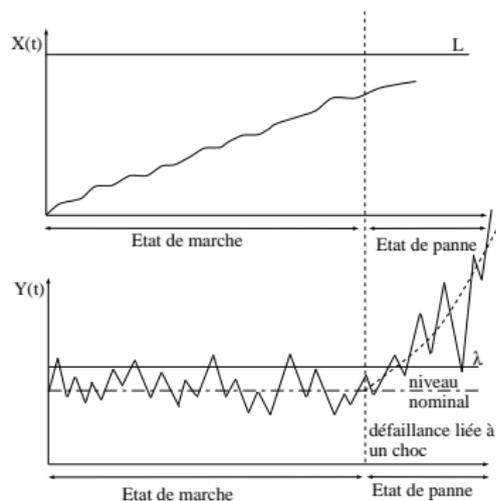
Modes de défaillance

Indicateur de fonctionnement : Z_t .

Mode 1
défaillance liée
au niveau excessif de dégradation

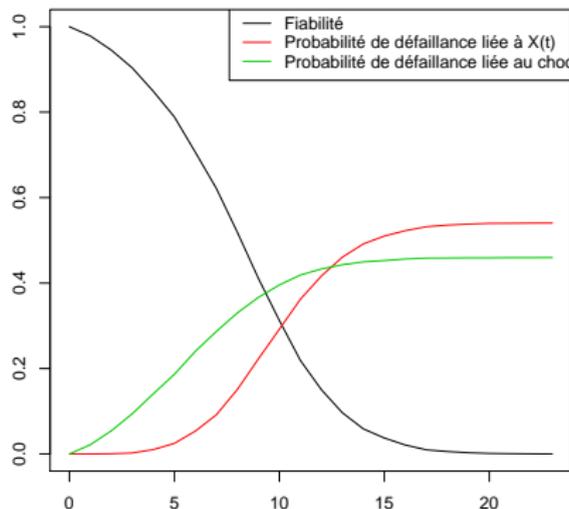


Mode 2
défaillance liée
au choc



Fiabilité

$$R(t_k) = \int_0^L \frac{\alpha^k e^{-\alpha x}}{\Gamma(k)} \frac{(F_A(1-p) + p)^k e^{-ax} (1 - e^{-ax})^{k-1}}{a^{k-1}} e^{-k(k-1)b/2} dx$$



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 systématique ;

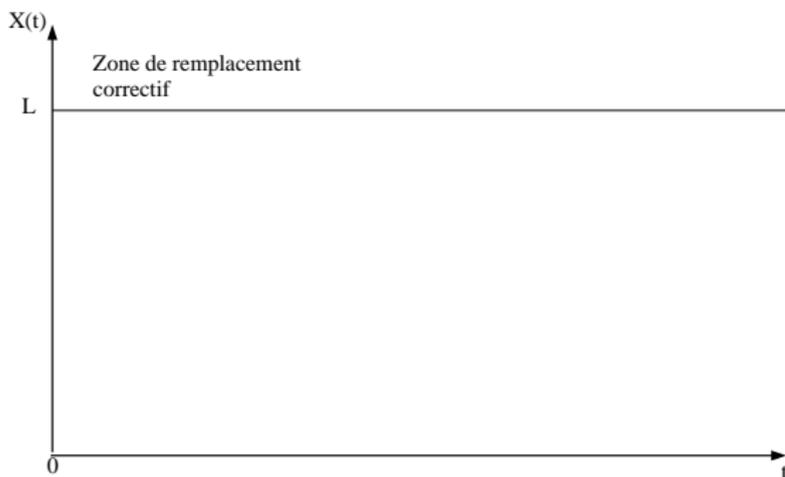
Maintenance conditionnelle pour $X(t)$

Objectif : prévention de la défaillance.



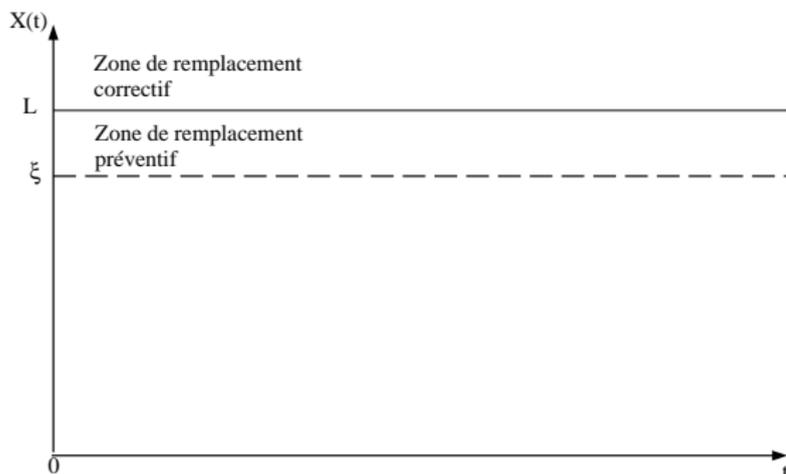
Maintenance conditionnelle pour $X(t)$

Objectif : prévention de la défaillance.



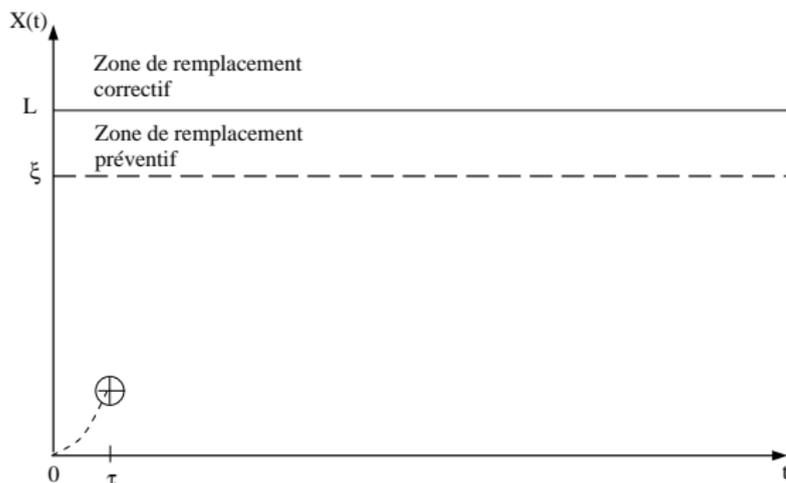
Maintenance conditionnelle pour $X(t)$

Objectif : prévention de la défaillance.



Maintenance conditionnelle pour $X(t)$

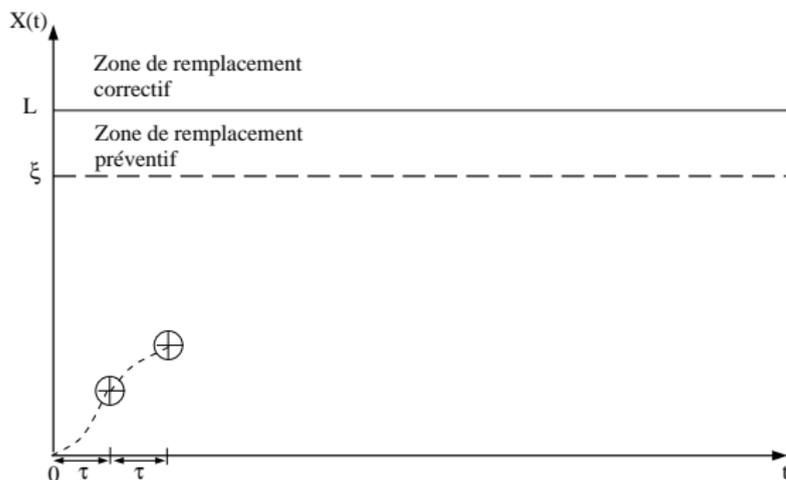
Objectif : prévention de la défaillance.



- Inspection, τ , C_{ix} .

Maintenance conditionnelle pour $X(t)$

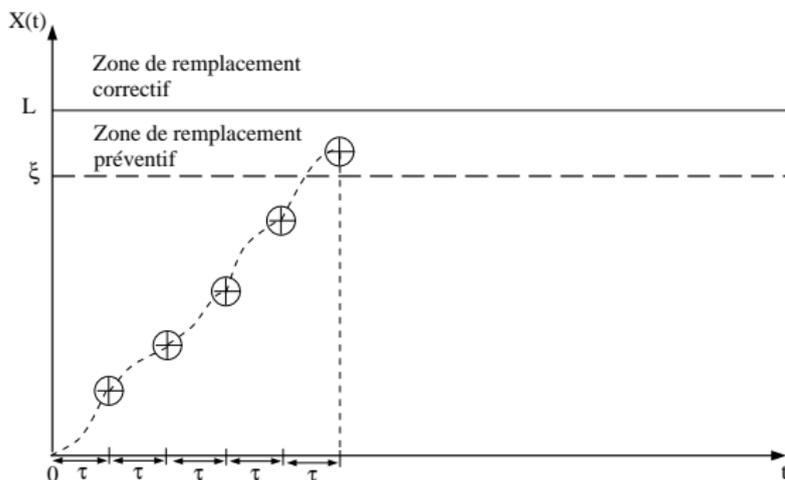
Objectif : prévention de la défaillance.



- Inspection, τ , C_{ix} .

Maintenance conditionnelle pour $X(t)$

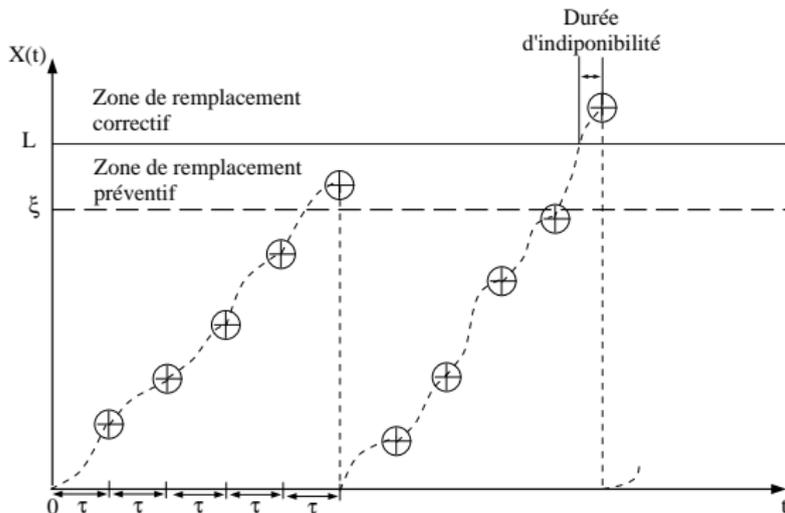
Objectif : prévention de la défaillance.



- 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, $X_t > L$, $c_c + c_{ix} + c_u D_u$.

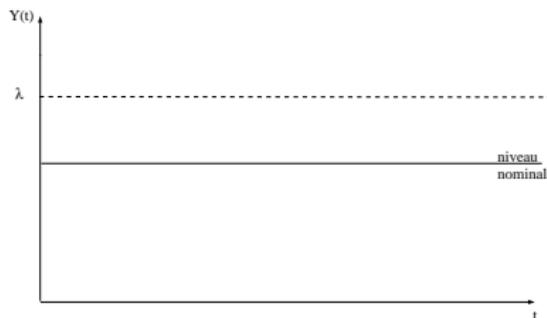
Une carte de contrôle pour Y_t



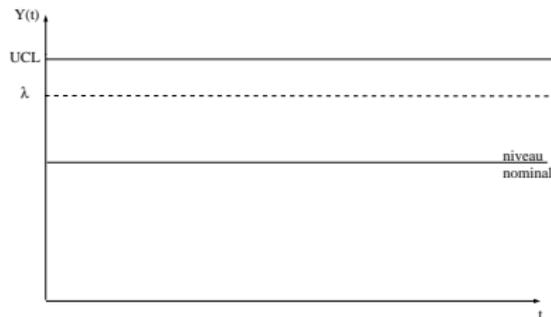
Une carte de contrôle pour Y_t



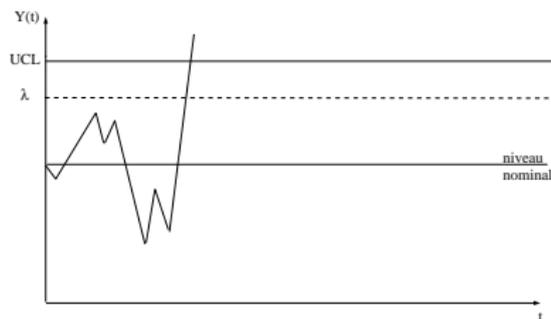
Une carte de contrôle pour Y_t



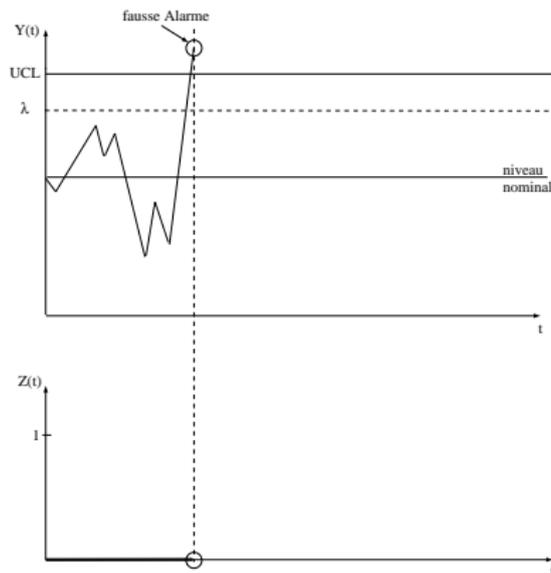
Une carte de contrôle pour Y_t



Une carte de contrôle pour Y_t

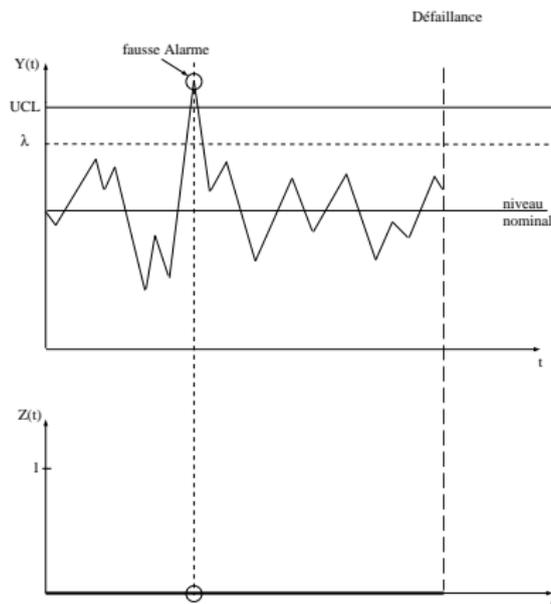


Une carte de contrôle pour Y_t



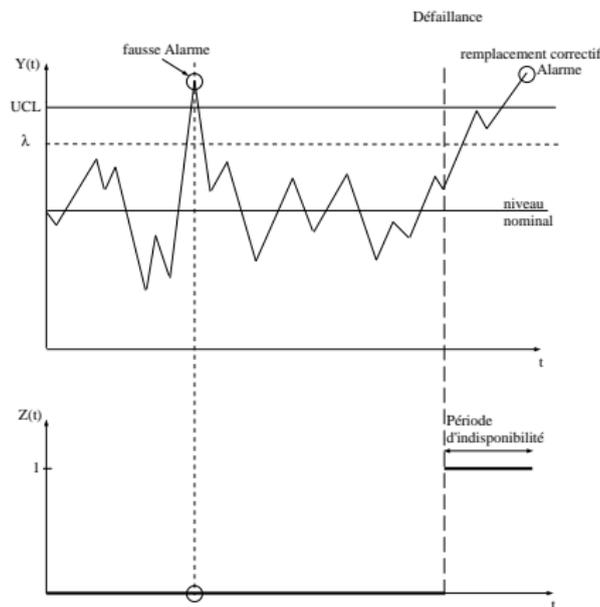
- Inspection de $Z(t)$, $Y(t) > UCL$, $c_{iz} (< c_{ix})$.

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



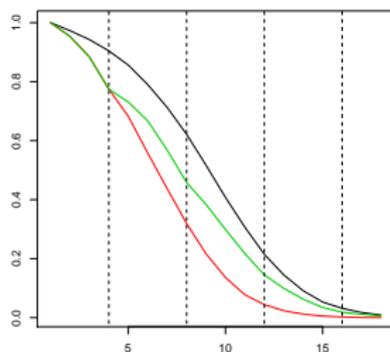
- Inspection de $Z(t)$, $Y(t) > UCL$, $c_{iz} (< c_{ix})$.
- Remplacement correctif, $Z(t) = 1$, $c_{iz} + c_c + c_u D_u$.

Schéma périodique pour maintenance systématique

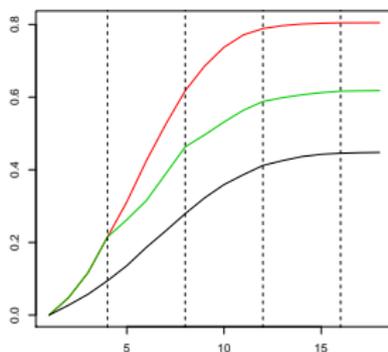
Pour réduire l'impact du stress \Rightarrow mise en place d'une action de maintenance périodique, δ .

Influence de δ :

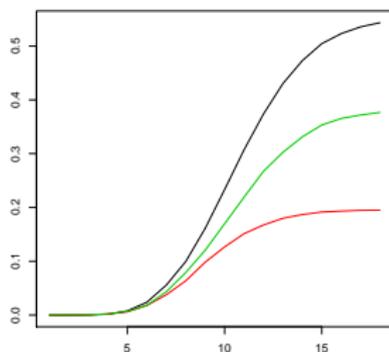
Fiabilité



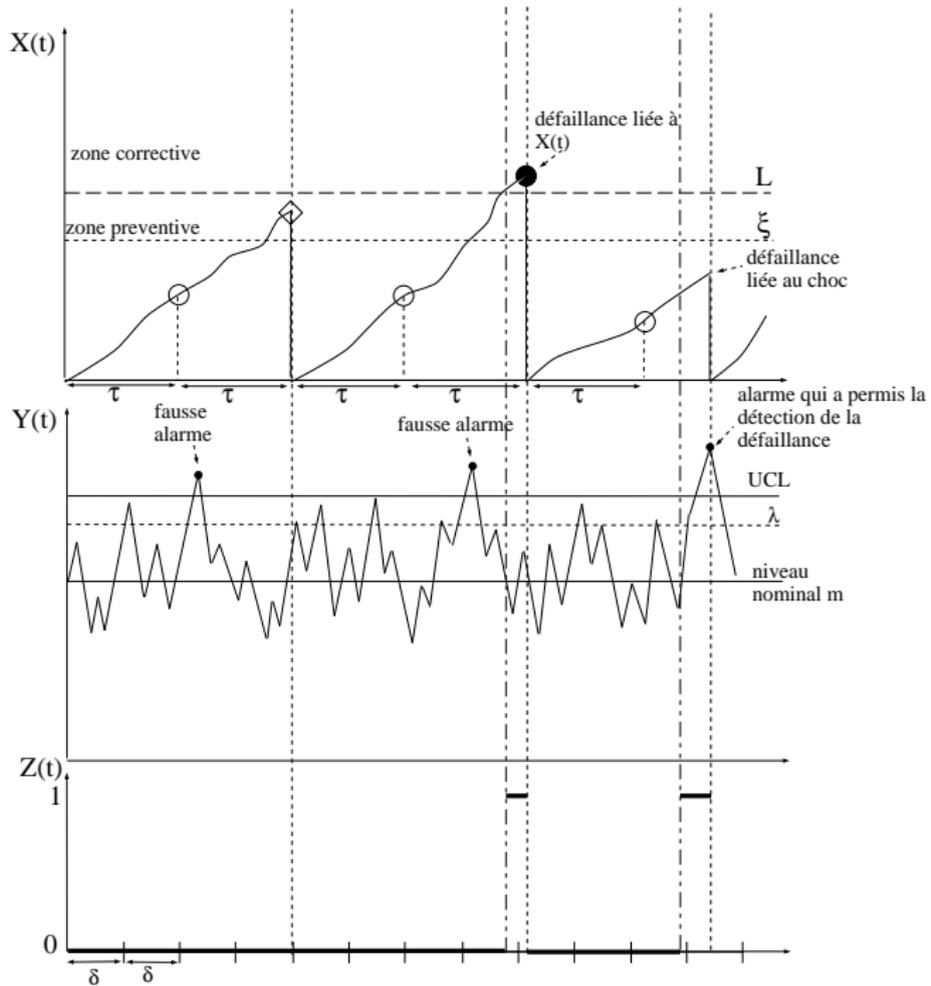
Proba. de défaillance liée au choc



Proba. de défaillance liée à $X(t)$



- Diminue la défiabilité en réduisant la probabilité de défaillance liée à un choc.



Critère de coût

$$C_{\infty}(\tau, \xi, UCL, \delta|\theta) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(t|\theta)}{t}$$

où $\theta = (a, b, F_A, \alpha, m, \mu, \sigma, \lambda, L)$, $C(t|\theta)$ est le coût cumulé de maintenance sur $[0, t]$, fonction de :

- nombre de X-inspections ;
- nombre de Z-inspections ;
- nombre de remplacements préventifs ;
- nombre de remplacements correctifs ;
- nombre d'actions de maintenance systématique ;
- durée d'indisponibilité du système.

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”.

⇒ 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”.

⇒ 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”.

⇒ 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.

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

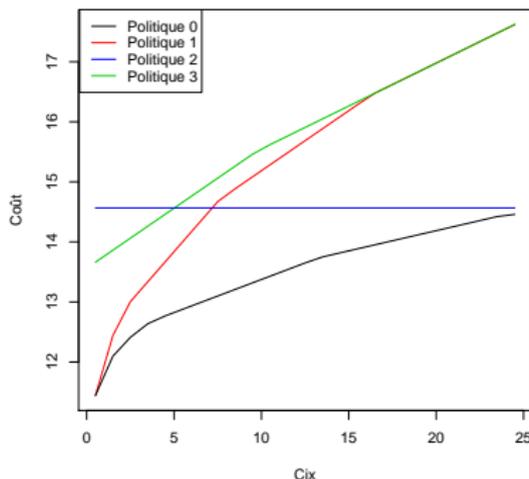
Calcul du temps moyen entre deux remplacements

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}(S|\theta) &= \sum_{i=0}^{\infty} \underbrace{\left[\mathbb{1}_{\{i>0\}} i\tau (R_m(i\tau - 1) - R_m(i\tau)) \right]}_{\text{défaillance juste avant inspection}} \\
 &+ \underbrace{\sum_{j=i\tau+1}^{(i+1)\tau-1} i\tau (R_m(j-1) - R_m(j)) \prod_{k=j}^{(i+1)\tau-1} \mathbb{P}(Y_k < UCL|fail.)}_{\text{défaillance entre 2 inspections mais non détectée}} \\
 &+ \underbrace{\sum_{j=i\tau+1}^{(i+1)\tau-1} j \mathbb{P}(Y_j > UCL|fail.) (R_m(j-1) - R_m(j))}_{\text{défaillance entre 2 inspections et}} \\
 &+ \underbrace{\mathbb{1}_{\{j>i\tau+1\}} \sum_{k=i\tau+1}^{j-1} j (R_m(k-1) - R_m(k)) \prod_{w=k}^{j-1} \mathbb{P}(Y_w < UCL|fail.)}_{\text{détectée par une carte contrôle}} \\
 &+ \underbrace{\mathbb{1}_{\{i>0\}} i\tau (R_i((i-1)\tau) - R_i(i\tau))}_{\text{remplacement préventif}}
 \end{aligned}$$

Comparaison avec des politiques de maintenance classiques

- Politique 0 : combinaison de la maintenance conditionnelle et carte de contrôle.
- Politique 1 : maintenance conditionnelle avec des inspections périodiques.
- Politique 2 : carte de contrôle classique.
- Politique 3 : politique de remplacement basée sur l'âge.

Performances économiques lorsque c_{iX} varie



- Politique 0 → toujours la politique qui minimise le critère de coût.
 - Dans cas limites politique 0 tend vers une politique classique.
- ⇒ Politique 0 = “généralisation” des politiques classiques.

Performance de la politique vis à vis des données de maintenance

Erreur d'estimation des caractéristiques du système	-10%	+10%
Perte relative comparé au coût optimal dégradation lente	5.618%	40.129%
Perte relative comparé au coût optimal dégradation rapide	0.866%	1.096%

- Moins de perte relative avec une erreur de -10%.
- En cas de doute \Rightarrow adopter une attitude conservative.

Conclusions et perspectives concernant le cas discret

Conclusions :

- Construction et évaluation d'une politique de maintenance adaptée pour un système présentant :
 - deux modes de défaillance
 - un mode de défaillance pour lequel la connaissance n'est pas totalement caractérisée ou disponible
- Illustration de l'intérêt de combiner les approches de maintenance conditionnelle et de surveillance des procédés.

Perspectives :

- Prendre en compte des dépendances mutuelles entre processus de dégradation et stress.
- Prise en compte du stress dans la politique de maintenance.

Plan de l'exposé

- 1 Contexte des travaux
 - Introduction de la problématique
 - Description des objectifs
- 2 Modélisation du système et de la maintenance
 - Description et modélisation du système
 - Politique de maintenance
 - Performance économique
 - Conclusions et perspectives
- 3 Extensions du modèle de maintenance
 - Intégration de dépendances mutuelles
 - Politique de maintenance stationnaire
 - Politiques de maintenance adaptatives
 - Modélisation continue du stress
- 4 Conclusions et perspectives

Intégration 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 **seul** mode de défaillance (plus de défaillance par choc) :

- 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**.
- Y_t : variable de stress \Rightarrow indicateur et cause de défaillance : modélisé par :
 - avant défaillance : un processus gaussien ;
 - après défaillance : un mouvement brownien général.

Influence de Y_t sur la dégradation

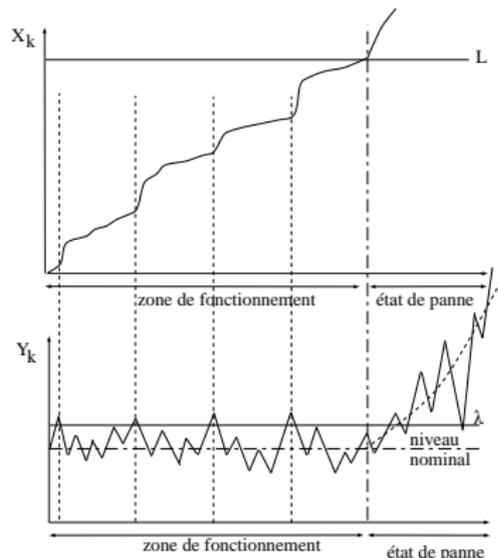
- *Pas d'impact* : Impact non mesurable.

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.

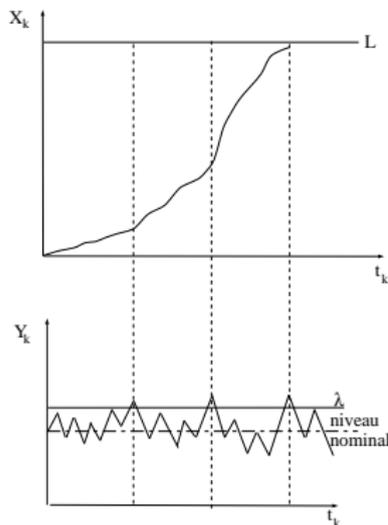


Influence de Y_t sur la dégradation

- *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.

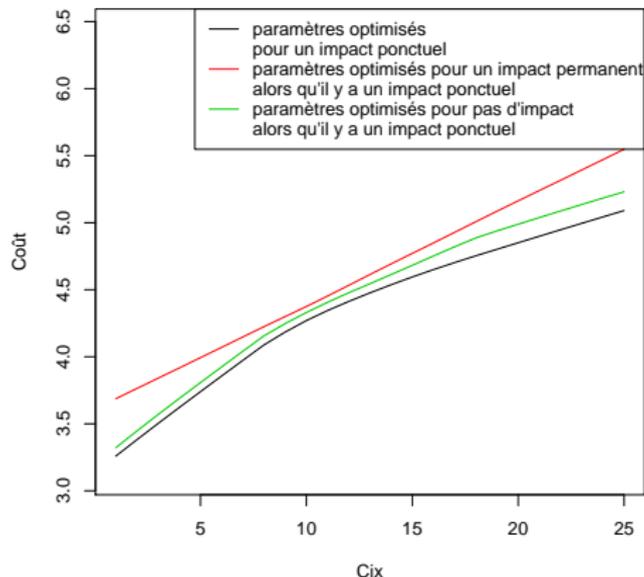
Politique de maintenance

- Mise en place d'une maintenance conditionnelle avec inspections périodiques sur X_t pour prévenir la défaillance.
- Mise en place d'une carte de contrôle sur Y_t pour détecter la défaillance au plus tôt.

Coûts devant être pris en compte :

- Coûts des opérations de maintenance possibles :
 - inspection de X_t au coût unitaire c_{ix} ;
 - inspection de Z_t déclenchée par Y_t au coût unitaire c_{iz} ;
 - remplacement corrective au coût unitaire c_c ;
 - remplacement préventif au coût unitaire c_p .
- Coût d'indisponibilité c_u .

Influence de la connaissance de l'impact du stress



- $\tau_{\text{pas impact}} > \tau_{\text{impact ponctuel}} \gg \tau_{\text{impact permanent}}$.
- 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 → bénéfique du schéma adaptatif.
- Politique 5 souligne le bénéfice lié aux intervalles inter-inspection décroissants.

Conclusions et perspectives

Conclusions :

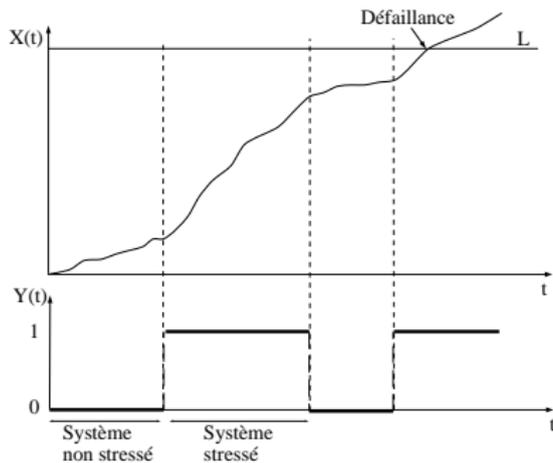
- Modèle de dégradation : dépendances mutuelles entre dégradation et stress.
- Construction de politiques “adaptatives” basées sur le nombre de sollicitations observées.
- Illustration des bénéfices engendrés par la capture de toute nouvelle information dans le modèle de décision en maintenance.

Perspectives :

- Modélisation du stress en temps continu.

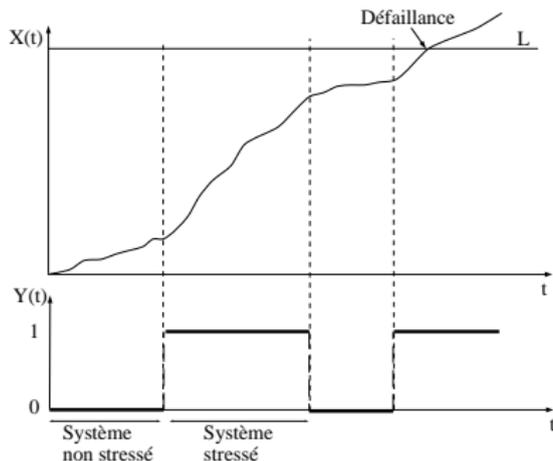
Modélisation du stress

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



Modélisation du stress

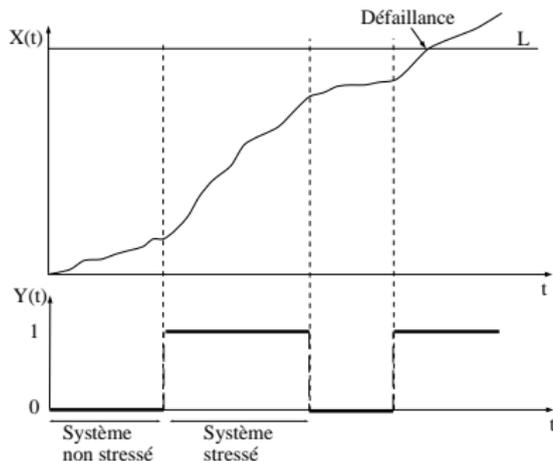
- Temps passé dans l'état non stressé $T_0 \sim \text{Exp}(\lambda_0 e^{-\lambda_0 t})$.
- Temps passé dans l'état stressé $T_1 \sim \text{Exp}(\lambda_1 e^{-\lambda_1 t})$.



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

Modélisation du stress

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

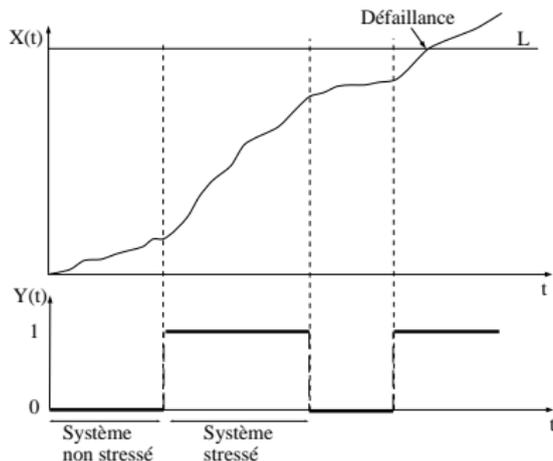


Système non stressé $\rightarrow X(t-s) \sim \Gamma(\alpha_0(t-s), \beta)$.

Système stressé : accélération de la vitesse de dégradation par un facteur e^γ .

Modélisation du stress

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



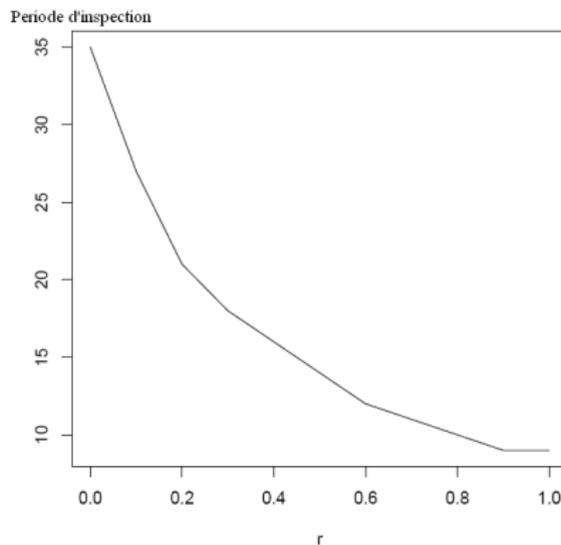
Système non stressé $\rightarrow X(t-s) \sim \Gamma(\alpha_0(t-s), \beta)$.

Système stressé : accélération de la vitesse de dégradation par un facteur e^γ .

En général $\rightarrow X(t-s) \sim \Gamma(\alpha_0(t-s)e^{\gamma Y(t-s)}, \beta)$.

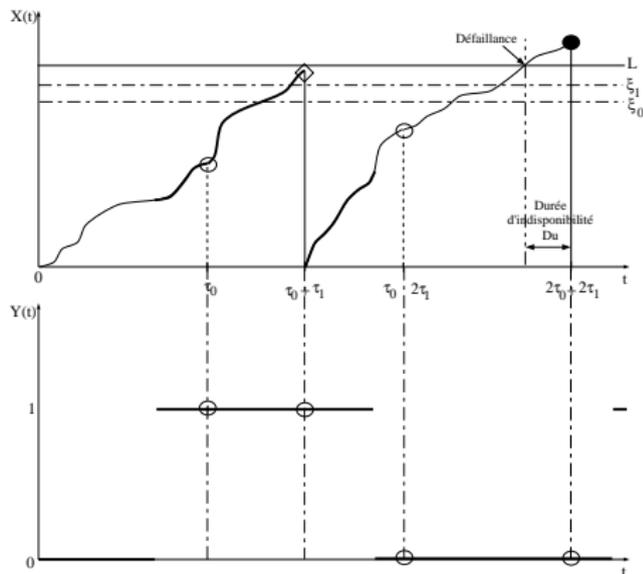
Politiques de maintenance

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



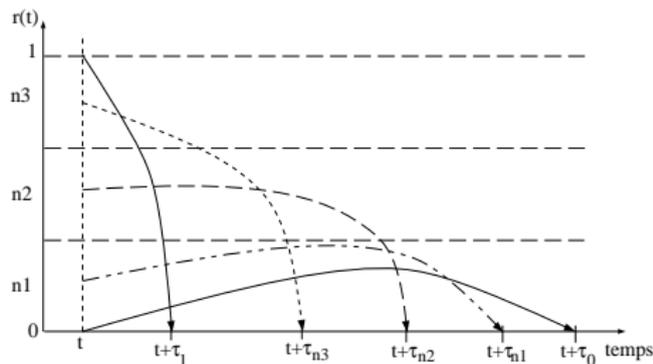
Politiques de maintenance

- 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.

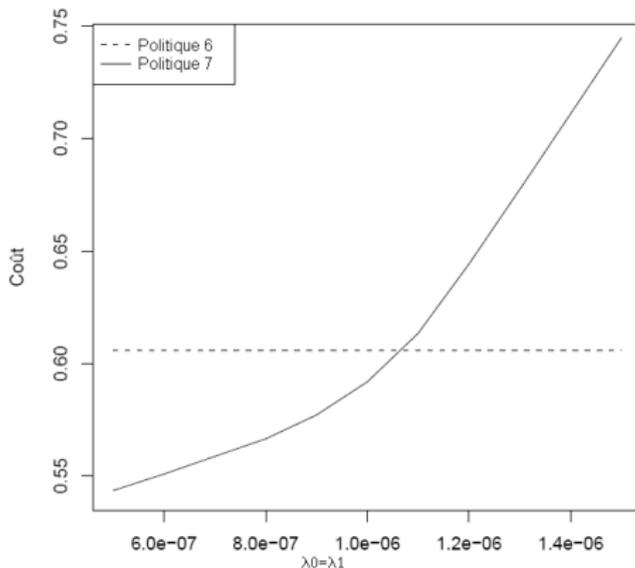


Politiques de maintenance

- Evolution continue de la politique en fonction de l'information disponible sur le stress : $(\tau_r(t), \xi_r(t))$.
- Politique de type seuils :

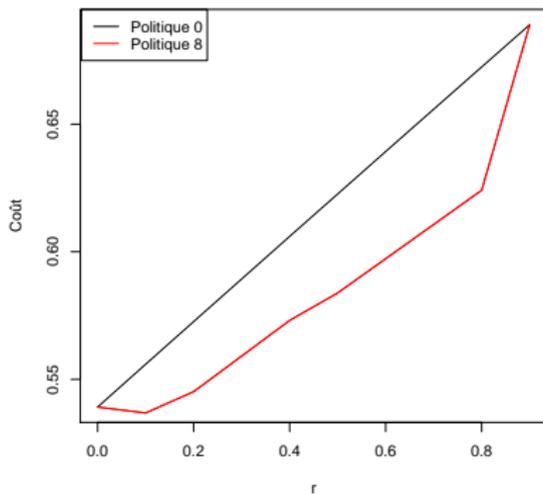


Politique stationnaire versus politique des permutations



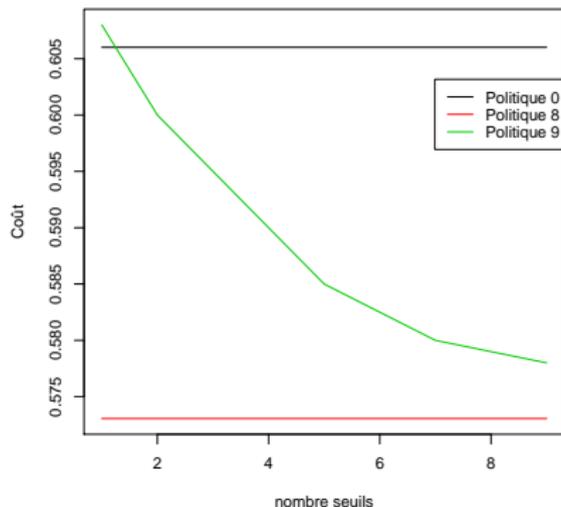
Politique des permutations (politique 7) minimise le critère de coût uniquement lorsque le temps passé dans un état est relativement long.

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



- Politique 8 → 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

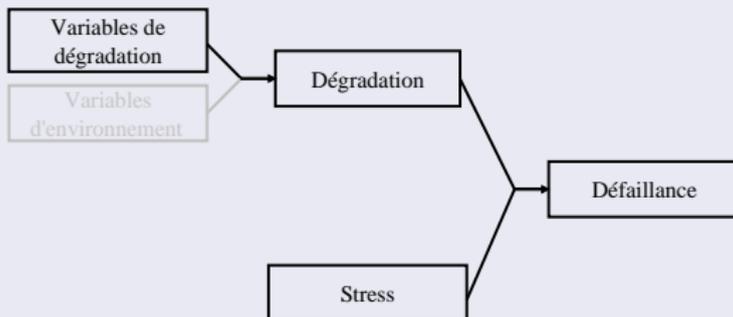
- Intégration de l'information sur le stress permet de réduire le critère de coût.
- Intégration du stress pas toujours évidente.
- La difficulté d'implémentation est proportionnelle au niveau de connaissance.

Plan de l'exposé

- 1 Contexte des travaux
 - Introduction de la problématique
 - Description des objectifs
- 2 Modélisation du système et de la maintenance
 - Description et modélisation du système
 - Politique de maintenance
 - Performance économique
 - Conclusions et perspectives
- 3 Extensions du modèle de maintenance
 - Intégration de dépendances mutuelles
 - Politique de maintenance stationnaire
 - Politiques de maintenance adaptatives
 - Modélisation continue du stress
- 4 Conclusions et perspectives

Conclusion générale

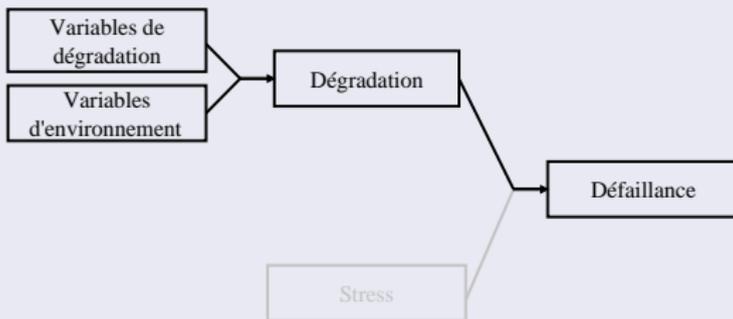
Conclusion générale :



- Modèles de défaillance : prise en compte du stress.
 - Un système avec deux modes de défaillance : dégradation et stress.

Conclusion générale

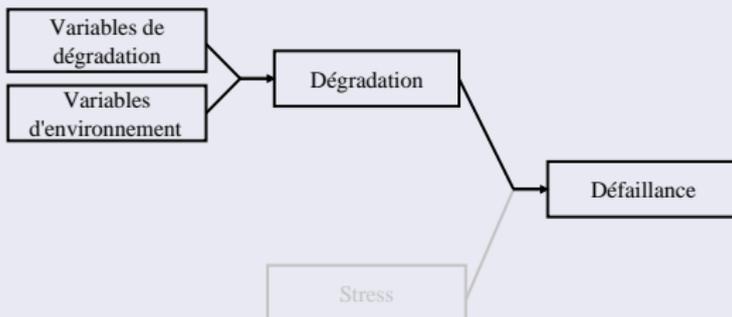
Conclusion générale :



- Modèles de défaillance : prise en compte du stress.
 - Un système avec deux modes de défaillance : dégradation et stress ou un mode de défaillance pour lequel la connaissance n'est pas totalement caractérisée ou disponible.

Conclusion générale

Conclusion générale :



- Modèles de défaillance : prise en compte du stress.
 - Un système avec deux modes de défaillance : dégradation et stress ou un mode de défaillance pour lequel la connaissance n'est pas totalement caractérisée ou disponible.
 - Un système avec un seul mode de défaillance mais une dépendance entre variables de dégradation et stress.

Conclusion générale :

- Modèles 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 :

- Modèles 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 \implies développer des modèles de maintenance basés sur une information partielle imparfaite.