

Maintenance conditionnelle et détection en ligne pour des systèmes à dégradation graduelle

Antoine GRALL

Université de Technologie de Troyes
ICD - CNRS FRE 2848

Modèles de maintenance conditionnelle

“Maintenance modelling vs. practice ? (see e.g. Dekker & Scarf, 1998)

● Introduction

Modélisation de la
dégradation

Maintenance et
dégradation graduelle

Maintenance et
détection en ligne

- Actuellement : politiques classiques bien établies en pratique
- Développement de moyens de surveillance et de systèmes de gestion de maintenance
- Besoins d'amélioration des performances de maintenance sous contraintes de ressources (budgétaires, matérielles...)

Intérêt de la maintenance conditionnelle (ou prédictive)

- Nécessité de modèles de performance orientés vers la pratique,
- aide au passage de politiques préventives statiques (et robustes) vers des politiques de maintenance conditionnelle dynamiques.

Modélisation de la maintenance

- Introduction

Modélisation de la
dégradation

Maintenance et
dégradation graduelle

Maintenance et
détection en ligne

☒ Évaluation de performances (coût, disponibilité) de politiques exploitant l'information disponible sur l'état courant du système (ou des composants) dans le processus de décision de maintenance.

- Politiques de maintenance conditionnelle pour des systèmes à détérioration continue
- Maintenance de systèmes multi-composants sous surveillance partielle ou imparfaite
- Politiques d'inspections et de maintenance pour des systèmes de sécurité passifs (inspections partielles, dépendances entre composants, maintenance imparfaite)

⇒ Éléments pour la prise de décision de maintenance et son optimisation



Étapes de modélisation & difficultés

● Introduction

Modélisation de la dégradation

Maintenance et dégradation graduelle

Maintenance et détection en ligne

- ☒ Modélisation des dégradations et de la surveillance
 - Prise en compte des incertitudes
 - Manque fréquent de données de maintenance

- ☒ Processus de décision de maintenance
 - Structure paramétrique prédéfinie ou non
 - Cadre stationnaire Markovien
 - Règles d'inspection

- ☒ Construction du modèle de performance

- ☒ Optimisation de la maintenance

- ☒ Validation du modèle



- Introduction

Modélisation de la dégradation

- dégradation
- exemple

Maintenance et
dégradation graduelle

Maintenance et
détection en ligne

Modélisation de la dégradation

Modélisation de dégradation

«Information de surveillance» ?

- Introduction

Modélisation de la
dégradation

- **dégradation**
- exemple

Maintenance et
dégradation graduelle

Maintenance et
détection en ligne

- Grandeurs physiques
 - Température : Gaz d'échappement de turboréacteurs
 - Géométrie : alignement et écartement de voies ferrées
 - Érosion : diamètre et nombre de trous d'érosion dans des digues
- Indicateurs de performance (nombre de défauts, qualité de production, ...)
- État des composants d'un système

Modèle de dégradation

- Introduction

Modélisation de la
dégradation

- **dégradation**
- exemple

Maintenance et
dégradation graduelle

Maintenance et
détection en ligne

- État du système caractérisé par un indicateur scalaire de niveau de dégradation
- Indicateur de dégradation monotone croissant
- Niveau de dégradation résultant d'une succession de dégradations aléatoires, sans considération d'ordre au cours du temps

⇒ **Processus Gamma**
(*processus de sauts*)

Modèle de dégradation

- Défaillances exclusivement consécutives à la détérioration
- Processus de détérioration markovien

- Introduction

Modélisation de la dégradation

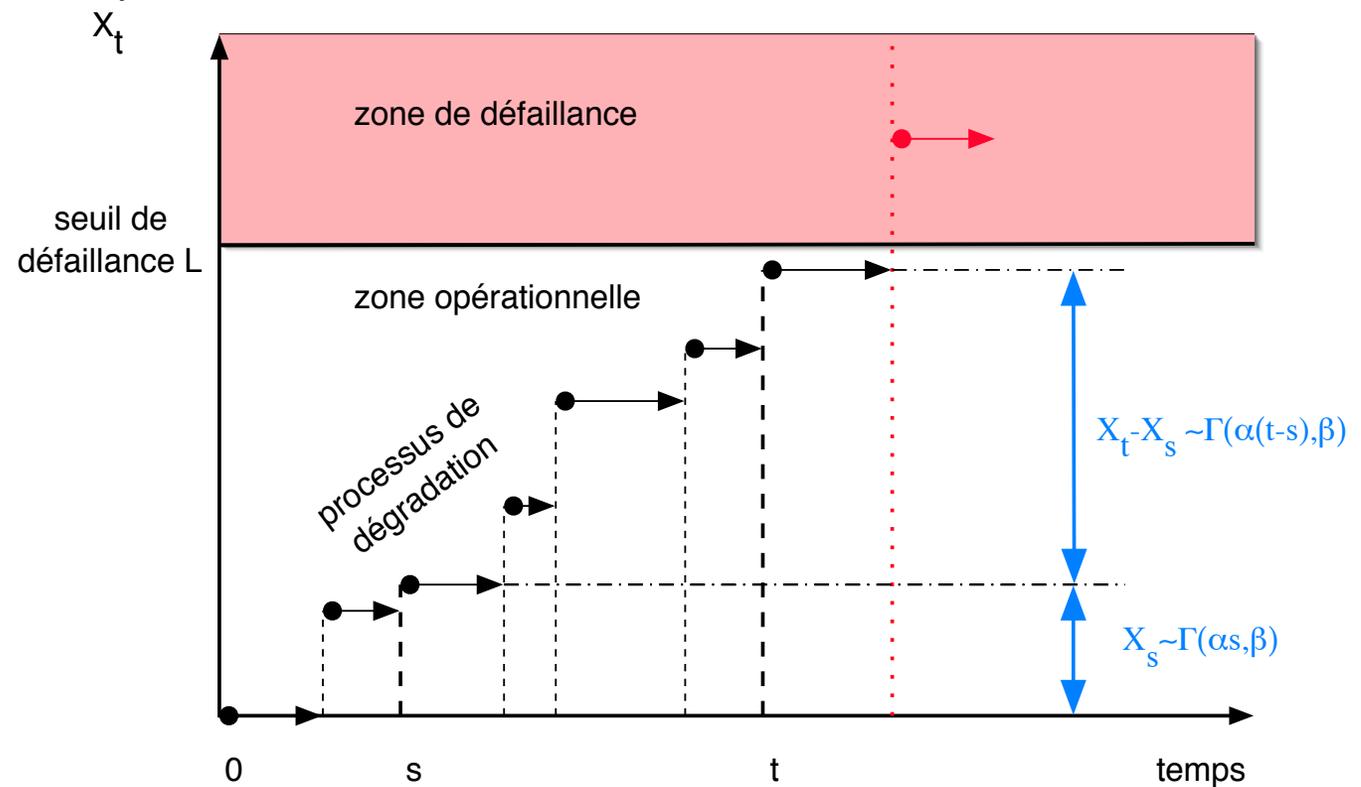
- **dégradation**

- exemple

Maintenance et dégradation graduelle

Maintenance et détection en ligne

état du système



Exemple : acier soumis à irradiation

● Introduction

Modélisation de la dégradation

● dégradation

● **exemple**

Maintenance et dégradation graduelle

Maintenance et détection en ligne

☒ Vieillessement d'un acier sous l'effet de l'irradiation.

☒ Indicateur : augmentation de la température de transition ductile/fragile ΔT_T en fonction de la fluence cumulée Φ (irradiation subie)

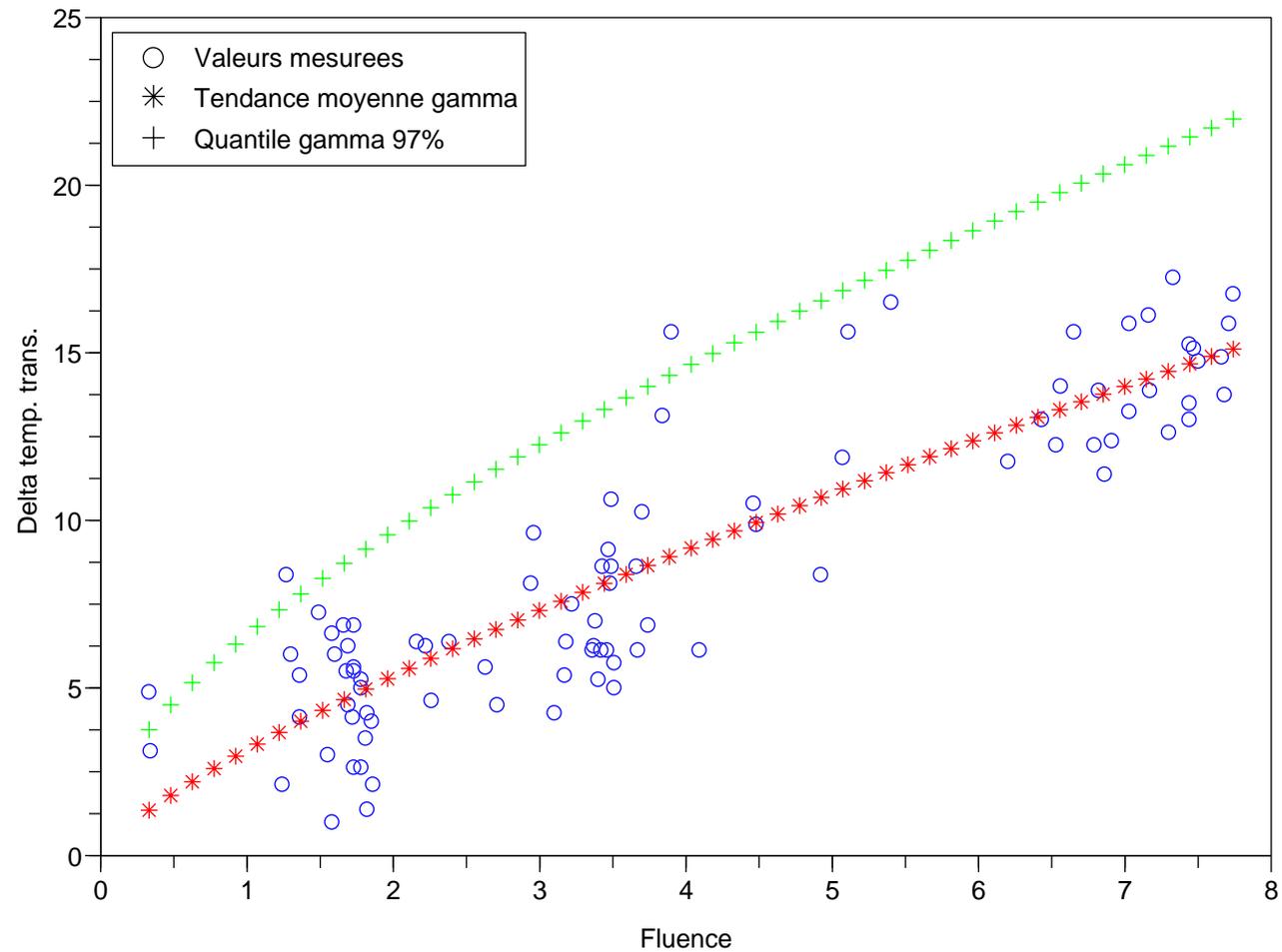
☒ Connaissance disponible ➡ Tendence d'évolution en Φ^δ

☞ Processus Gamma «homogène», paramètre de forme $\alpha\Phi^\delta$, paramètre d'échelle β .

Exemple : acier soumis à irradiation

- Introduction
- Modélisation de la dégradation
- dégradation
- **exemple**
- Maintenance et dégradation graduelle
- Maintenance et détection en ligne

Comparaison tole xxxxxx



Exemple : acier soumis à irradiation

☒ Disponibilité de données complémentaires relatives à la composition de l'acier (teneur en différents composants)

⇒ Covariables $\theta \in \mathbb{R}^p$.

● Introduction

Modélisation de la dégradation

● dégradation

● exemple

Maintenance et dégradation graduelle

Maintenance et détection en ligne

☞ Cadre du processus Gamma : paramètre de forme $\alpha(\theta)\Phi^\delta$, paramètre d'échelle $\beta(\theta)$.

$$\mathbb{E}(X_{\phi_1} - X_{\phi_2}) = \alpha(\theta)(\phi_1^\delta - \phi_2^\delta)\beta(\theta)$$

$$\text{var}(X_{\phi_1} - X_{\phi_2}) = \alpha(\theta)(\phi_1^\delta - \phi_2^\delta)\beta(\theta)^2$$

Quel niveau de complexité du modèle en fonction des données disponibles, des objectifs et des capacités d'exploitation ? Contexte de la prise de décision de maintenance.



Maintenance et dégradation graduelle

- Introduction

Modélisation de la
dégradation

**Maintenance et
dégradation graduelle**

- Généralités
- Décision
- Critère

Maintenance et
détection en ligne



Modèle de maintenance

- Introduction

Modélisation de la dégradation

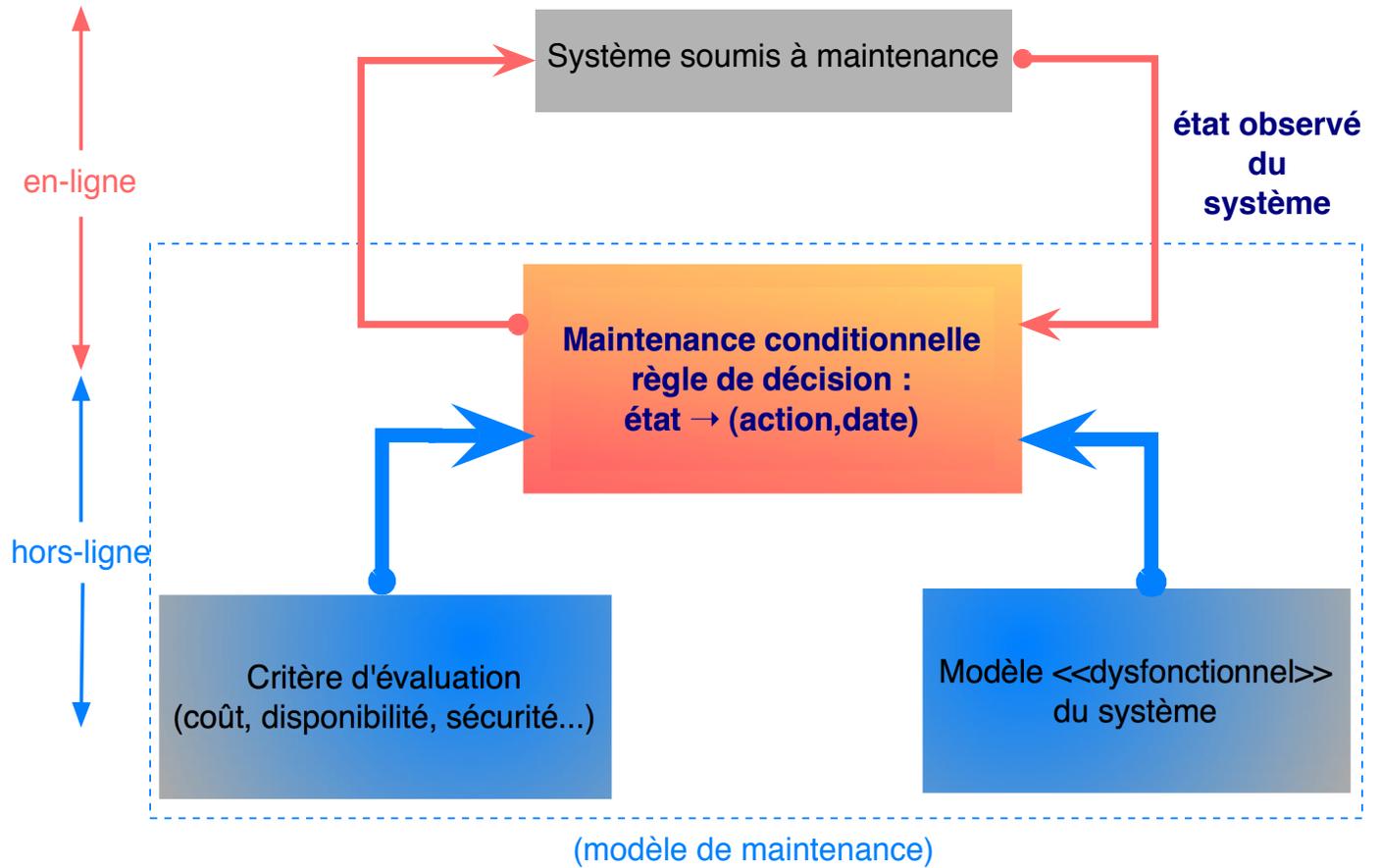
Maintenance et dégradation graduelle

- Généralités

- Décision

- Critère

Maintenance et détection en ligne



Surveillance par inspection

Objectif : construction d'un modèle d'aide à la décision en maintenance

- Introduction

Modélisation de la
dégradation

Maintenance et
dégradation graduelle

- **Généralités**

- Décision

- Critère

Maintenance et
détection en ligne



prise en compte conjointe

- de la planification des inspections
- des décisions d'opération de maintenance



possibilité de différentes opérations de maintenance

⇒ Choix d'une stratégie, évaluation et optimisation
Nécessité de développer un modèle de coût

Règle de décision

Méthodologie générale :

- Introduction

Modélisation de la dégradation

Maintenance et dégradation graduelle

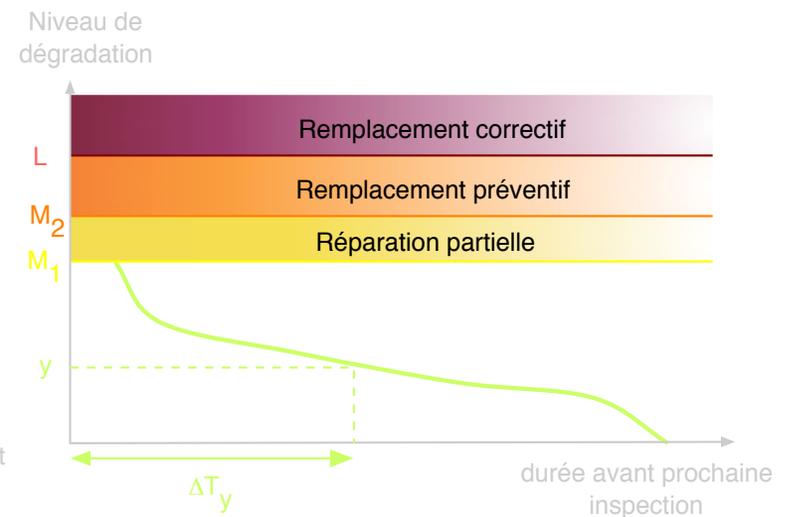
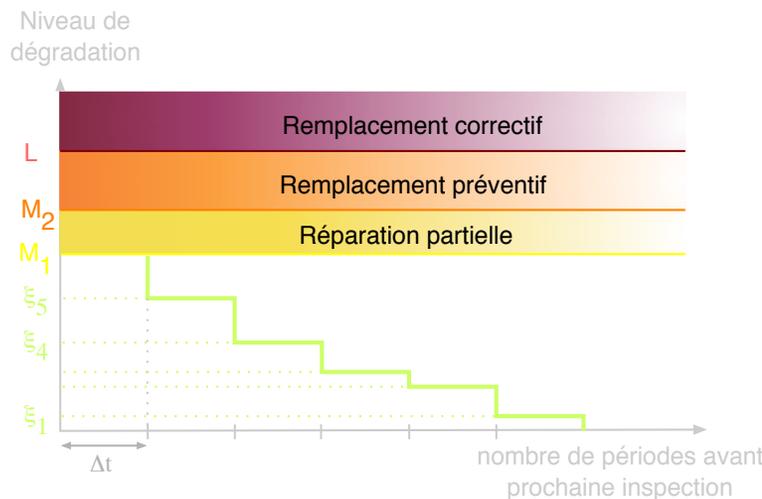
- Généralités

- **Décision**

- Critère

Maintenance et détection en ligne

- règle de décision à structure paramétrique imposée



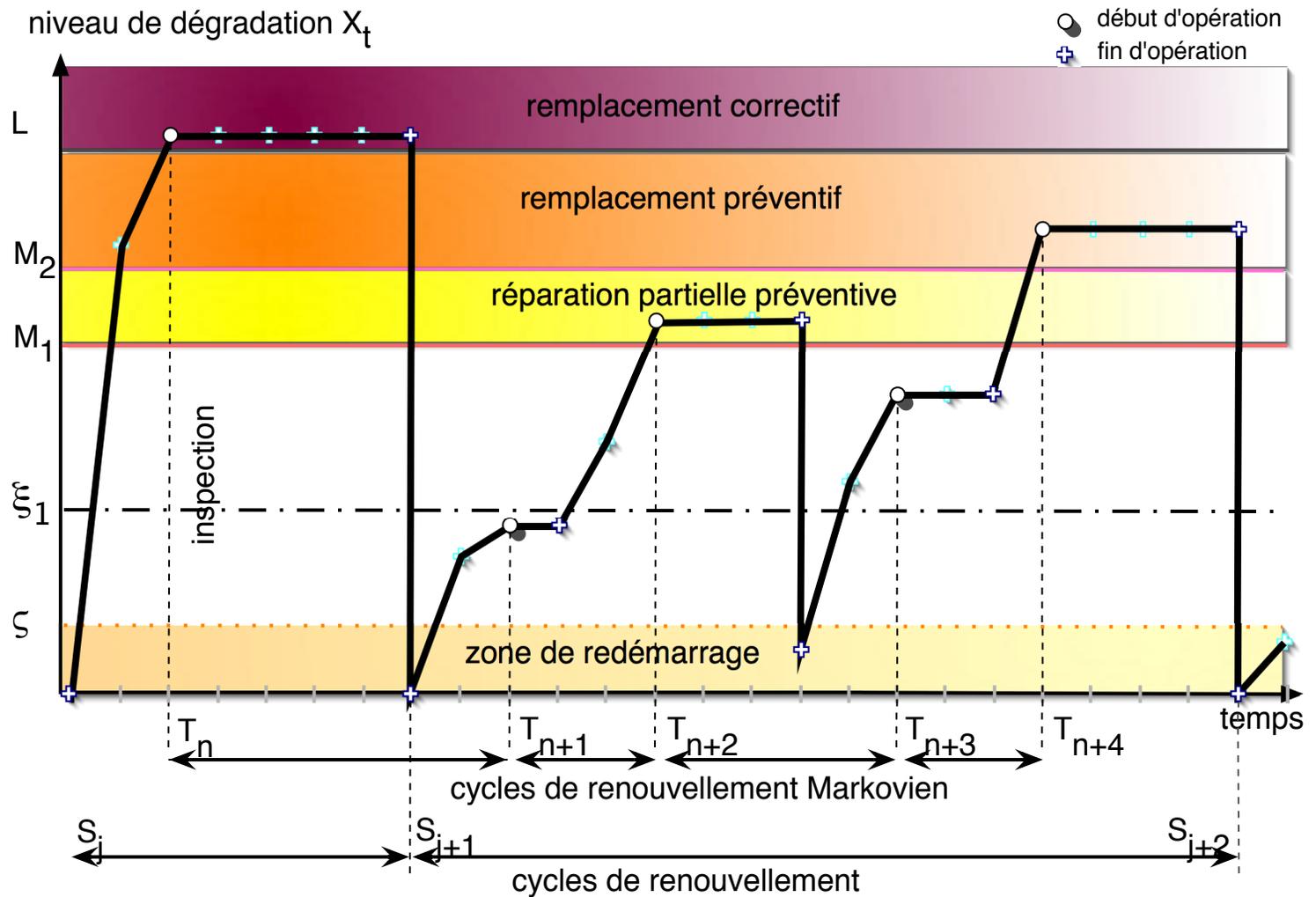
- exploitation des propriétés stochastiques des processus sous-jacents (propriétés «semi-régénératives»).

Exemple d'évolution

- Introduction
- Modélisation de la dégradation

- Maintenance et dégradation graduelle
- Généralités
- **Décision**
- Critère

- Maintenance et détection en ligne





Critère d'évaluation

Choix du coût moyen par unité de temps à long terme :

- Introduction

Modélisation de la
dégradation

Maintenance et
dégradation graduelle

- Généralités

- Décision

- Critère

Maintenance et
détection en ligne

$$EC_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E}(C_{op}(t) + C_{ind}(t))}{t}$$

☞ $C_{op}(t)$: coût lié aux opérations de
maintenance/inspection

☞ $C_{ind}(t)$: coût d'indisponibilité du système



Modèle de coût

Propriétés semi-régénératives du processus d'évolution du système maintenu :

- Introduction

Modélisation de la
dégradation

Maintenance et
dégradation graduelle

- Généralités
- Décision
- Critère

Maintenance et
détection en ligne

$$\blacktriangleright \quad \mathbb{E}C_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E}(C(t))}{t} = \frac{\mathbb{E}_{\pi}(C(T))}{\mathbb{E}_{\pi}(T)}$$

☺ *scénarios sur un cycle de renouvellement markovien*

☹ *détermination de la loi stationnaire de l'état aux instants d'inspection*



- Introduction

Modélisation de la
dégradation

Maintenance et
dégradation graduelle

**Maintenance et
détection en ligne**

- Généralités
- Décision
- Détection
- Isolation
- Évaluation
- Conclusion

Maintenance et détection en ligne

Modèle de dégradation

- Introduction

Modélisation de la
dégradation

Maintenance et
dégradation graduelle

Maintenance et
détection en ligne

- **Généralités**

- Décision
- Détection
- Isolation
- Évaluation
- Conclusion

- ☒ Identification de différents régimes de dégradation correspondant à une séparation des covariables en plusieurs classes Θ_i
- ☒ Début d'un cycle de vie en régime nominal et changement de régime possible à un instant donné (régime i si $\theta \in \Theta_i$)
- ☒ Covariable non surveillées directement \Rightarrow nécessité de détection de changement sur la base des mesures de dégradation



Degradation - Monitoring

- Introduction

- Modélisation de la dégradation

- Maintenance et dégradation graduelle

- Maintenance et détection en ligne

- Généralités

- Décision

- Détection

- Isolation

- Évaluation

- Conclusion

- ☒ Connaissance parfaite du niveau de dégradation par le biais d'inspections périodiques

dates d'inspections : $t_i = i \Delta t$

- ☒ Actions de maintenance conditionnelle préventives ou correctives

- ☒ Processus de dégradation :

$$X_t = X_t^1 \mathbb{I}_{\{t \leq T_0\}} + (X_{T_0}^1 + X_{t-T_0}^{2,i}) \mathbb{I}_{\{t > T_0, \theta \in \Theta_i\}}$$

- ☒ Défaillance non auto-déclarative (indisponibilité possible)

Décision de maintenance

Cadre de décision paramétrique :

- Principe du cas mono-régime : remplacement (préventif) dès que le niveau de dégradation dépasse un seuil donné
- Cas limites \Rightarrow différentes zones de maintenance préventive
 - \Rightarrow Régime 1 (nominal) : remplacement préventif à l'instant t_i si $M_{\text{nom}} \leq X_{t_i} < L$

- Introduction

- Modélisation de la dégradation

- Maintenance et dégradation graduelle

- Maintenance et détection en ligne

- Généralités

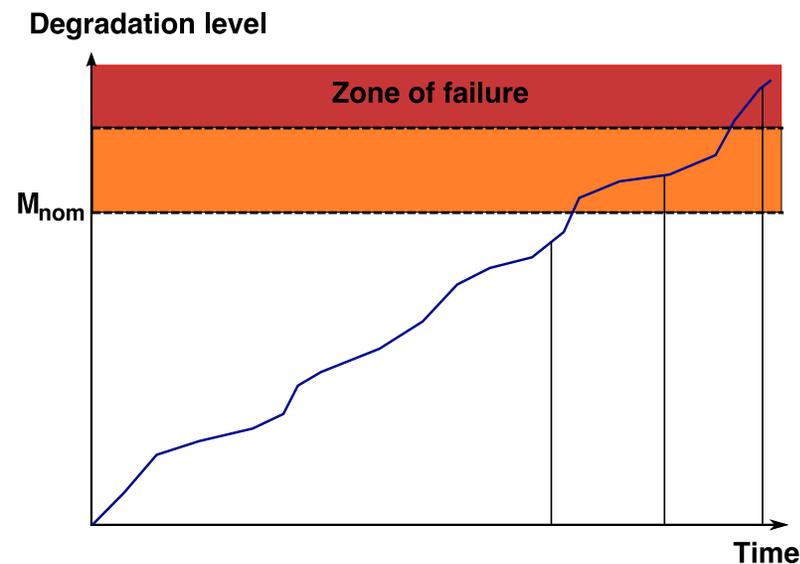
- **Décision**

- Détection

- Isolation

- Évaluation

- Conclusion



Décision de maintenance

Cadre de décision paramétrique :

- Principe du cas mono-régime : remplacement (préventif) dès que le niveau de dégradation dépasse un seuil donné
- Cas limites \Rightarrow différentes zones de maintenance préventive
 - \supset Régime 1 (nominal) : remplacement préventif à l'instant t_i si $M_{\text{nom}} \leq X_{t_i} < L$
 - \supset Régime 2 (accéléré) : remplacement préventif à l'instant t_i if $M_{\text{ac}} \leq X_{t_i} < L$

● Introduction

Modélisation de la dégradation

Maintenance et dégradation graduelle

Maintenance et détection en ligne

● Généralités

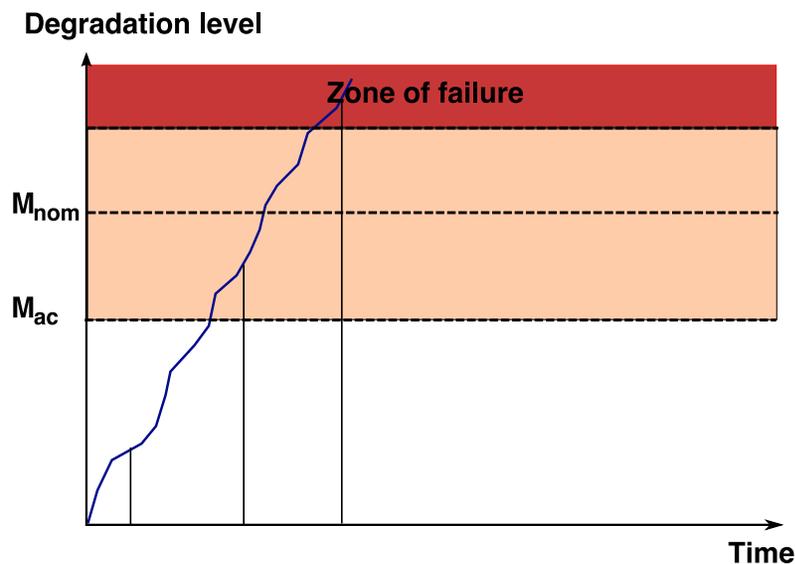
● **Décision**

● Détection

● Isolation

● Évaluation

● Conclusion



Décision de maintenance

Cadre de décision paramétrique :

- Introduction

Modélisation de la
dégradation

Maintenance et
dégradation graduelle

Maintenance et
détection en ligne

- Généralités
- **Décision**
- Détection
- Isolation
- Évaluation
- Conclusion

- Principe du cas mono-régime : remplacement (préventif) dès que le niveau de dégradation dépasse un seuil donné
- Cas limites \Rightarrow différentes zones de maintenance préventive
 - \supset Régime 1 (nominal) : remplacement préventif à l'instant t_i si $M_{\text{nom}} \leq X_{t_i} < L$
 - \supset Régime 2 (accéléré) : remplacement préventif à l'instant t_i if $M_{\text{ac}} \leq X_{t_i} < L$
 - $\supset M_{\text{ac}} \leq M_{\text{nom}}$ (taux de dégrad. accél. > taux de dégrad. nom.)
- Détection **en ligne** de changement de régime à partir des niveaux de dégradation observés $\Leftrightarrow t_{\text{detect}}$.

Décision de maintenance

- Introduction

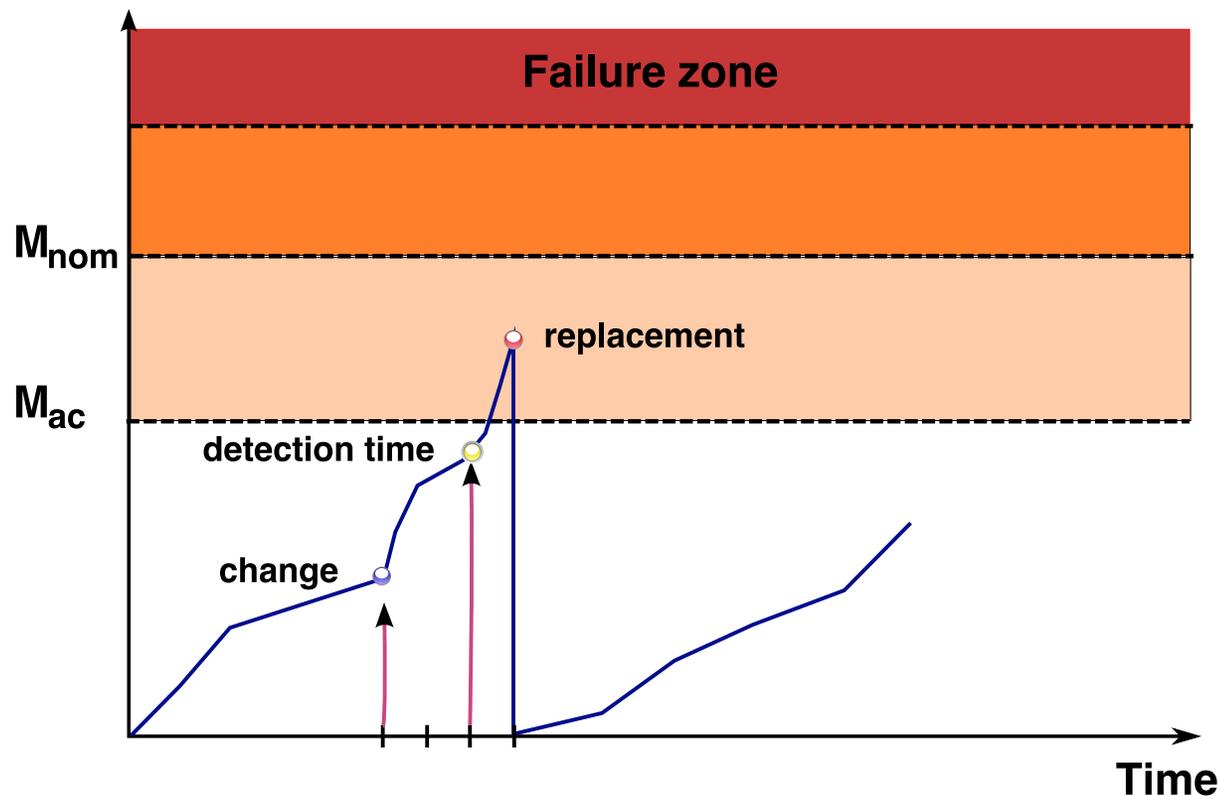
Modélisation de la dégradation

Maintenance et dégradation graduelle

Maintenance et détection en ligne

- Généralités
- **Décision**
- Détection
- Isolation
- Évaluation
- Conclusion

Degradation level




 $X_{t_{detect}} < M_{ac}$: remplacement à l'instant t_n t.q.

$$X_{t_{n-1}} < M_{ac} < X_{t_n}$$

Décision de maintenance

- Introduction

Modélisation de la dégradation

Maintenance et dégradation graduelle

Maintenance et détection en ligne

- Généralités

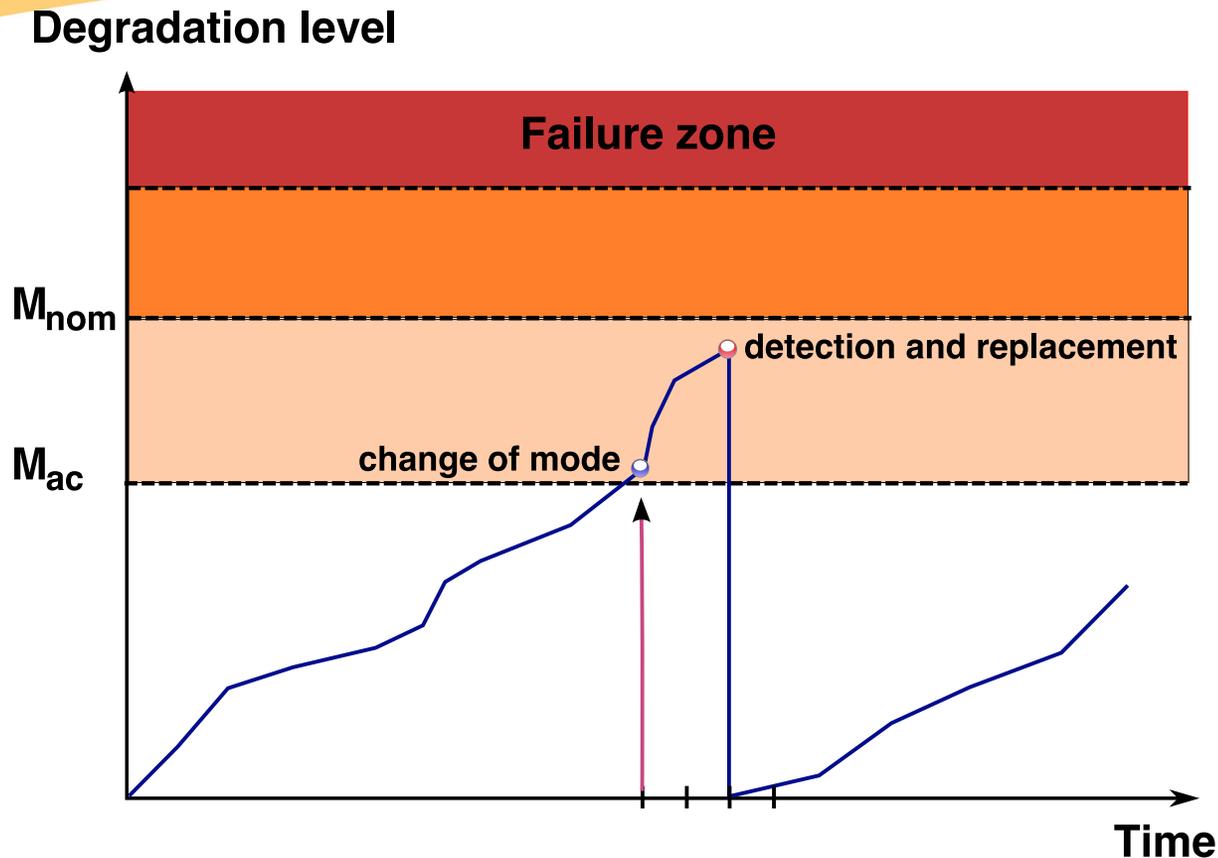
- **Décision**

- Détection

- Isolation

- Évaluation

- Conclusion




 $M_{ac} \leq X_{t_{detect}} \leq M_{nom}$: remplacement à l'instant t_{detect}



Décision de maintenance

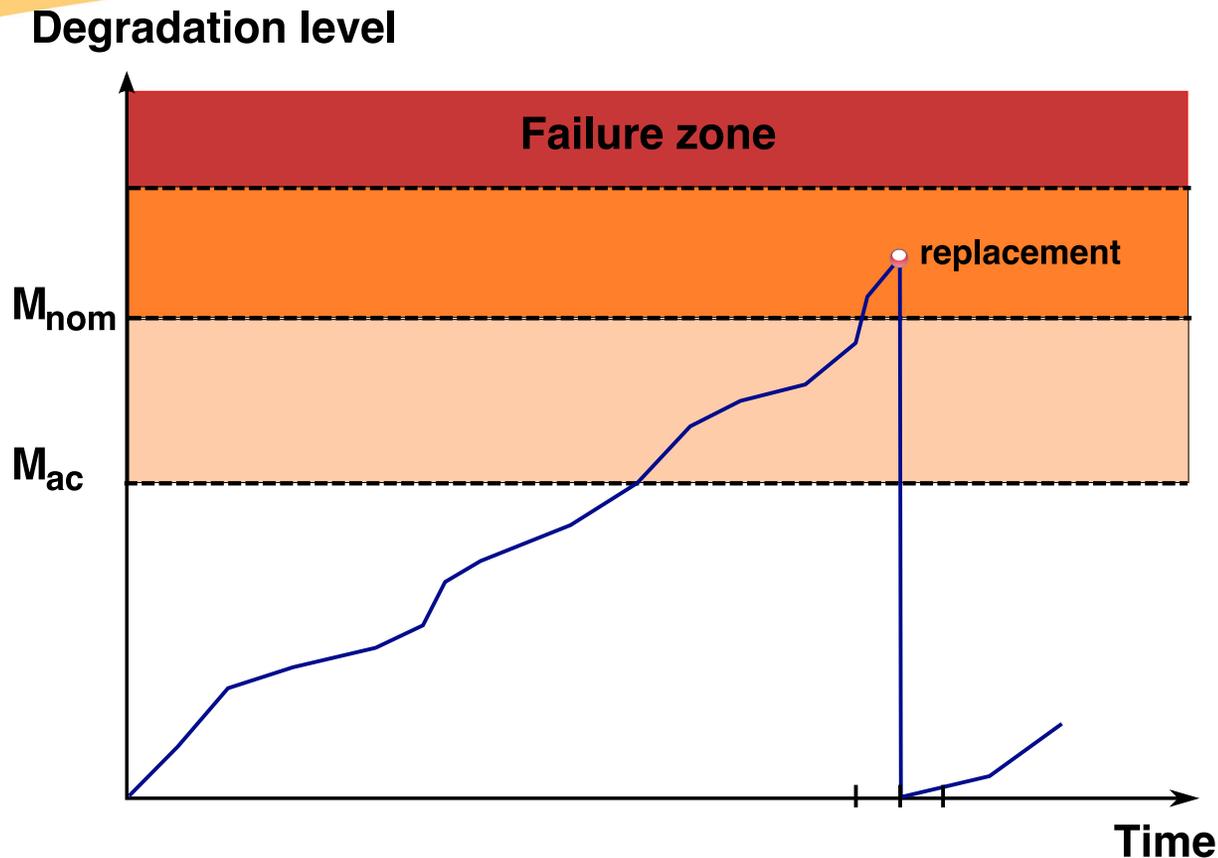
- Introduction

Modélisation de la dégradation

Maintenance et dégradation graduelle

Maintenance et détection en ligne

- Généralités
- **Décision**
- Détection
- Isolation
- Évaluation
- Conclusion




 $M_{nom} \leq X_{t_{detect}}$: remplacement à l'instant t_n t.q.

$$X_{t_{n-1}} < M_{nom} < X_{t_n}$$

Détection de changement en ligne

☒ Règle d'arrêt (type CUSUM) : $t_{\text{detect}} = N\Delta t$ avec

$$N = \min \left\{ n \geq 1, \max_{1 \leq k \leq n} \sum_{t=k}^n \log \frac{f_{\text{mode } 2}(x_{k\Delta t})}{f_{\text{mode } 1}(x_{k\Delta t})} \geq \textcircled{h} \right\}$$

où $f_{\text{mode } i}$ = pdf de $\Gamma(\alpha_i \Delta t, \beta_i)$, $i = 1, 2$.

☒ Résultats théoriques asymptotiques : taux de fausse alarme tend vers 0

⇒ choix du paramètre h dans un cadre Bayésien (π_0 loi a priori de T_0) :

$$\int_0^{\infty} \pi_0(u) \Pr_0(N < u) du \leq \alpha.$$

● Introduction

Modélisation de la dégradation

Maintenance et dégradation graduelle

Maintenance et détection en ligne

● Généralités

● Décision

● **Détection**

● Isolation

● Évaluation

● Conclusion



Détection de changement en ligne

☒ Règle d'arrêt (type CUSUM) : $t_{\text{detect}} = N\Delta t$ avec

$$N = \min \left\{ n \geq 1, \max_{1 \leq k \leq n} \sum_{t=k}^n \log \frac{f_{\text{mode } 2}(x_{k\Delta t})}{f_{\text{mode } 1}(x_{k\Delta t})} \geq h \right\}$$

où $f_{\text{mode } i}$ = pdf de $\Gamma(\alpha_i \Delta t, \beta_i)$, $i = 1, 2$.

☒ Résultats théoriques asymptotiques : taux de fausse alarme tend vers 0

⇒ choix du paramètre h dans un cadre Bayésien (π_0 loi a priori de T_0) :

$$\int_0^{\infty} \pi_0(u) \Pr_0(N < u) du \leq \alpha.$$

☒ Du point de vue de la maintenance : valeur du paramètre h liée au coût de maintenance.

- Introduction

- Modélisation de la dégradation

- Maintenance et dégradation graduelle

- Maintenance et détection en ligne

- Généralités

- Décision

- **Detection**

- Isolation

- Évaluation

- Conclusion

Détection et isolation

- Introduction

- Modélisation de la dégradation

- Maintenance et dégradation graduelle

- Maintenance et détection en ligne

- Généralités
- Décision
- Détection
- **Isolation**
- Évaluation
- Conclusion

- ☒ Identification de K différents régimes de dégradation après changement. Chaque classe Θ_i dans l'espace des covariables correspond à des paramètres de dégradation $(\alpha_{2i}, \beta_{2i})$.
- ☒ Règle de décision de maintenance :
 - Paramètres de maintenance optimisés pour chaque régime de dégradation identifié.
 - Début de chaque cycle en conditions nominales.
 - Si détection de changement : isolation du régime de dégradation après changement puis adaptation des paramètres de décision de maintenance.



Détection et isolation

☒ Pour chaque second mode l possible :

$$N^*(l) = \inf_{p \geq 1} \{ N^l(p) \}$$

$$\text{avec } N^l(p) = \inf \left\{ q \geq p \mid \min_{0 \leq j \neq l \leq K} S_p^q(l, j) \geq h_l \right\}$$

$$S_p^q(l, j) = \sum_{i=p}^q \log \frac{f_l(Y_i)}{f_j(Y_i)}.$$

☒ Temps d'arrêt et décision finale :

$$N^* = \min \{ N^*(l), 1 \leq l \leq K \}$$

$$v^* \text{ tel que } N^*(v^*) = N^*$$

● Introduction

Modélisation de la
dégradation

Maintenance et
dégradation graduelle

Maintenance et
détection en ligne

● Généralités

● Décision

● Détection

● **Isolation**

● Évaluation

● Conclusion



Détection et isolation

☒ Pour chaque second mode l possible :

$$N^*(l) = \inf_{p \geq 1} \left\{ N^l(p) \right\}$$

avec $N^l(p) = \inf \left\{ q \geq p \mid \min_{0 \leq j \neq l \leq K} S_p^q(l, j) \geq h_l \right\}$

$$S_p^q(l, j) = \sum_{i=p}^q \log \frac{f_l(Y_i)}{f_j(Y_i)}.$$

☒ Du point de vue de la maintenance : K paramètres h_l à déterminer pour minimiser le coût de maintenance.

● Introduction

Modélisation de la
dégradation

Maintenance et
dégradation graduelle

Maintenance et
détection en ligne

● Généralités

● Décision

● Détection

● **Isolation**

● Évaluation

● Conclusion



Évaluation de la politique de maintenance

☒ Coût de maintenance à long terme par unité de temps

$$C_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E}(C(t))}{t}$$

où

$$C(t) = C_i N_i(t) + C_p N_p(t) + C_c N_c(t) + C_u d_u(t)$$

- $N_i(t)$ nombre d'inspections avant t .
- $N_p(t)$ ($N_c(t)$) nombre de remplacements preventifs (correctifs) avant t .
- $d_u(t)$ durée d'indisponibilité cumulée du système avant before t .

☒ Optimisation de $(\Delta T, M_{nom})$ and M_{ac} (à régime unique),

☒ Optimisation des paramètres de détection/isolation h (Simulation de Monte Carlo).

● Introduction

Modélisation de la dégradation

Maintenance et dégradation graduelle

Maintenance et détection en ligne

● Généralités

● Décision

● Détection

● Isolation

● **Évaluation**

● Conclusion



Résultats numériques (détection)

Optimisation de la détection de changement en fonction du coût de maintenance

- Introduction

- Modélisation de la dégradation

- Maintenance et dégradation graduelle

- Maintenance et détection en ligne

- Généralités

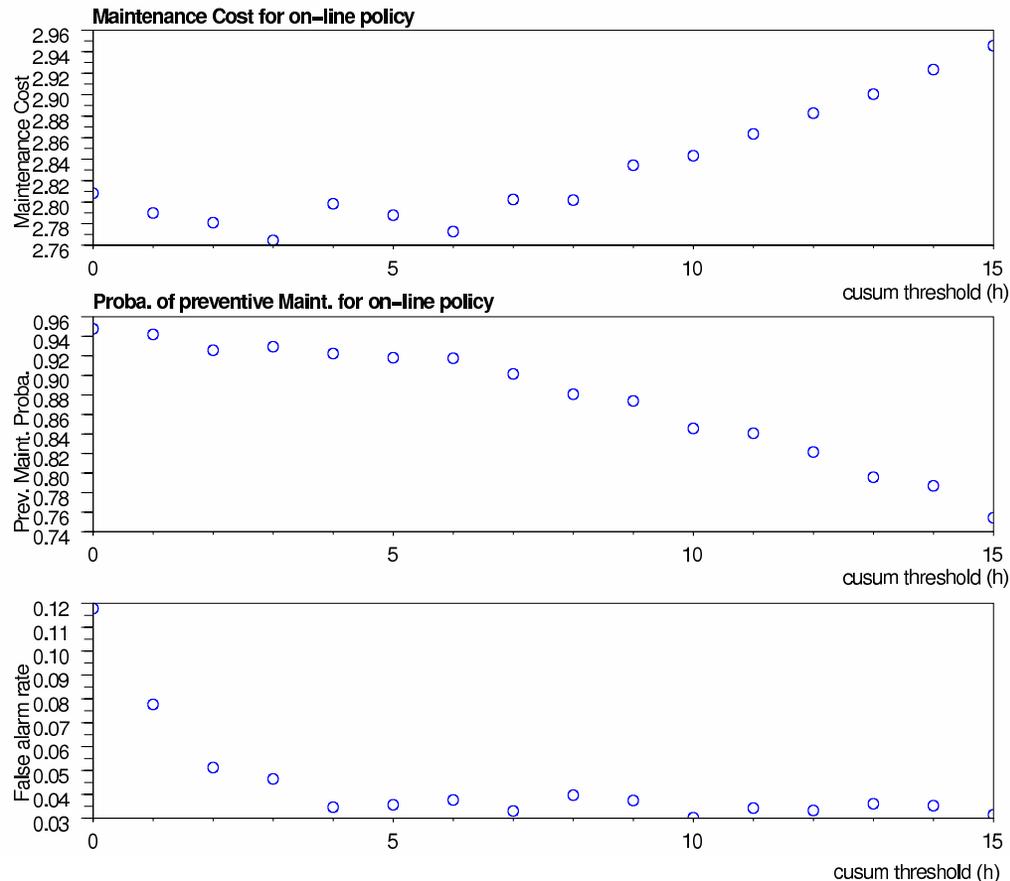
- Décision

- Détection

- Isolation

- **Évaluation**

- Conclusion



$(C_i = 5, C_p = 50, C_c = 100, \text{ and } C_u = 250, T_0 \sim \mathcal{E}(1/30))$

☒ Intérêt du développement d'un modèle de dégradation avec prise en compte de covariables et algorithme de changement de mode ?

- Introduction

- Modélisation de la dégradation

- Maintenance et dégradation graduelle

- Maintenance et détection en ligne

- Généralités

- Décision

- Détection

- Isolation

- **Évaluation**

- Conclusion

case	α_2	β_2	M_{ac}	$\tau\Delta t$
1	2	1	85.6	41.57
2	1	3	74.6	15.32
3	2	2	73.7	8.42
4	1	7	51.6	3.41

case	$\pi_0 \sim \mathcal{U}(0, 100)$	$\pi_0 \sim \mathcal{E}(1/50)$	one threshold
1	1.97 (0%)	2.00 (-1.5%)	1.97
2	2.11 (4.5%)	2.15 (3%)	2.21
3	2.15 (9%)	2.21 (6%)	2.36
4	2.32 (13%)	2.41 (9.5%)	2.66

Coût de maintenance pour deux distributions de T_0 .

Conclusion

- Introduction

- Modélisation de la dégradation

- Maintenance et dégradation graduelle

- Maintenance et détection en ligne

- Généralités
- Décision
- Détection
- Isolation
- Évaluation
- Conclusion

- ☒ Expérimentation d'une prise en compte de changement de régime de dégradation
- ☒ Algorithme de mise à jour en ligne des paramètres de décision
- ☒ Problème d'optimisation complexe (nécessité de calcul du coût par simulation - cas de l'isolation)
- ☒ Quel critère de décision pour choisir entre un modèle à «régime de dégradation unique» ou à «régimes de dégradation multiple»