

Estimation de la durée de vie résiduelle et optimisation de la maintenance prédictive : application à des véhicules industriels

Elias KHOURY¹
E. DELOUX¹, A. GRALL¹ et C. BERENGUER²

¹Université de Technologie de Troyes
²Institut National Polytechnique Grenoble

Réunion GT S³
18 Janvier 2013

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Modélisation de la défaillance basée sur la dégradation
- 3 Estimation de la durée de vie résiduelle
- 4 Prise de décision en maintenance - approche prédictive
- 5 Conclusion

Plan

- 1 Introduction
- 2 Modélisation de la défaillance basée sur la dégradation
- 3 Estimation de la durée de vie résiduelle
- 4 Prise de décision en maintenance - approche prédictive
- 5 Conclusion

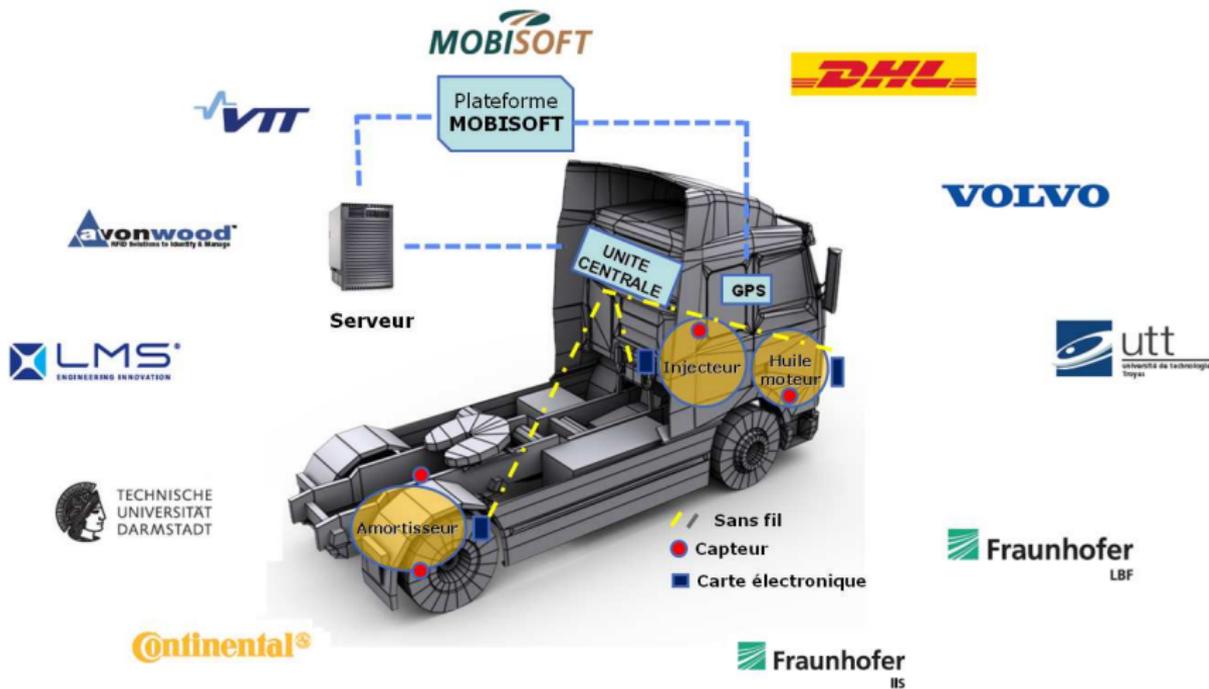
*La maintenance est “l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le **maintenir** ou à le **rétablir** dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise” [NF EN 13306 X60-319].*

*“Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au **coût global optimal**” [NF X 60-000].*

↪ La maintenance préventive est le levier sur lequel on peut agir.

Amélioration de la prise de décision à travers le passage de la maintenance préventive systématique à la maintenance préventive dynamique basée sur les informations de surveillance.

Maintenance on Demand (MoDe) - Concept



Objectifs de MoDe

- Maintenance proactive vis à vis des besoins des clients quelle que soient les conditions d'usage actuel du véhicule.
- Réseau de capteurs fiable avec des interfaces génériques et programmables permettant un pré-traitement des données.
- Prédiction dynamique de la durée de vie restante et mise à jour de la planification des opérations de maintenance.
- Système de soutien logistique pour une gestion des pièces de rechange "à la demande".
- Réduction des coûts, des risques et des émissions de CO₂.

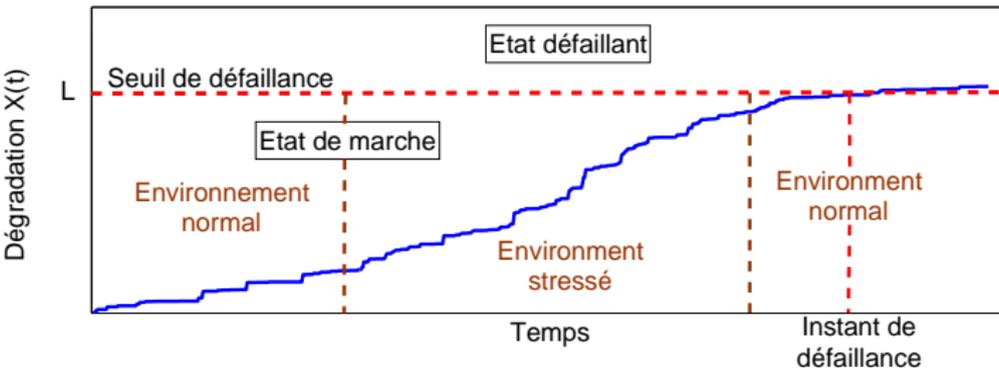
Pour répondre aux enjeux de MoDe :

- Onze volets techniques et de management reflétant la structure logique et naturelle du travail.
- Volet 7 : Développements méthodologiques en terme de modélisation pour la prise de décision en maintenance :
 - Modélisation de la défaillance basée sur la dégradation.
 - Prédiction de la durée de vie résiduelle.
 - Prise de décision en maintenance - approche prédictive.
- Optimisation des performances et évaluation de l'intérêt des développements.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Modélisation de la défaillance basée sur la dégradation**
- 3 Estimation de la durée de vie résiduelle
- 4 Prise de décision en maintenance - approche prédictive
- 5 Conclusion

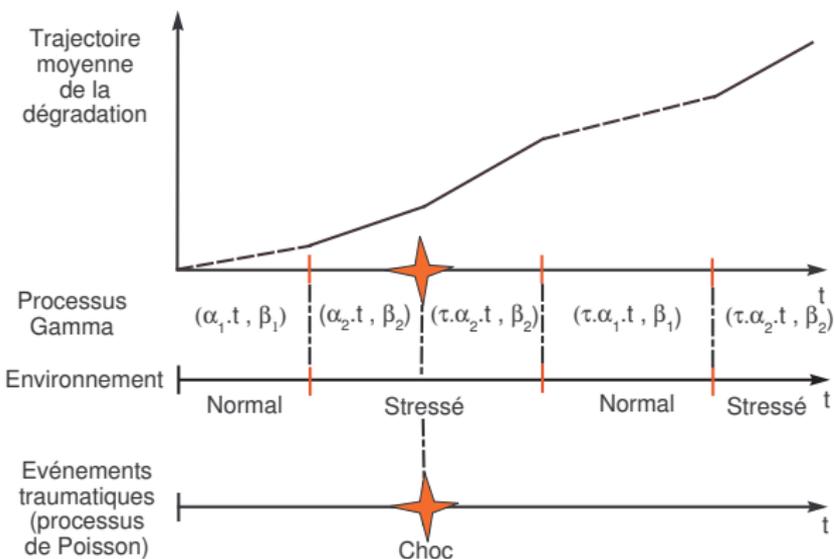
Modélisation de la défaillance basée sur la dégradation



- ◇ Etude/adaptation/développement de modèles génériques avec différents comportements de la dégradation et mécanismes de défaillance.
- ◇ Deux contributions :
 - Etude théorique : modèle à effet de stress permanent.
 - Etude d'un cas pratique : l'huile moteur.

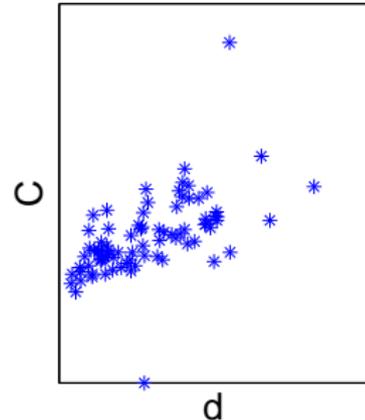
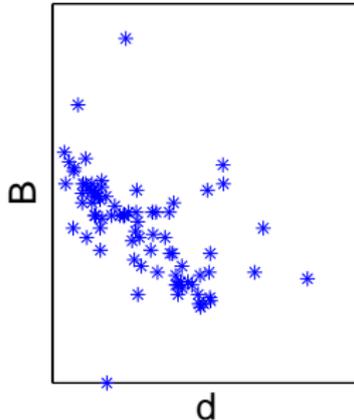
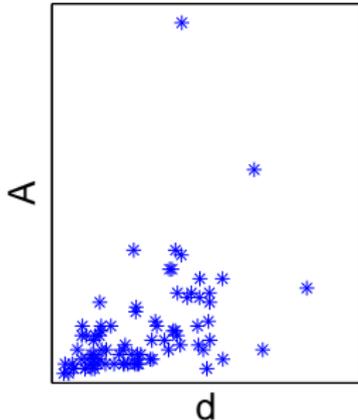
Modèle à effet de stress permanent

- ◇ Cas classiques : une fois l'état de l'environnement a changé, l'état précédent n'a plus aucun effet sur le système.
- ◇ Modèle à effet de stress permanent :

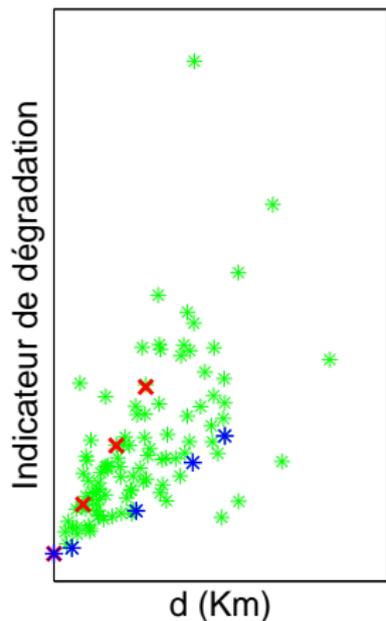


Cas pratique dans le contexte de MoDe : l'huile moteur

- ◇ Données de laboratoire de Volvo dans deux mode de fonctionnement : normal et stressé.
- ◇ Avis d'expert : trois caractéristiques A, B et C.
- ◇ Seuil pour chacune des caractéristiques mais relation entre elles inconnues.



Analyse en Composante Principale (ACP)



Modèle de défaillance basée sur la dégradation.

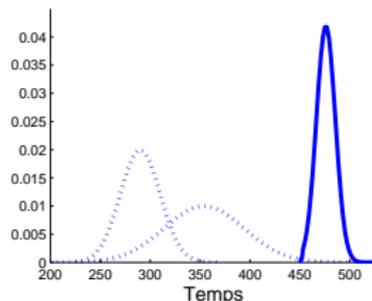
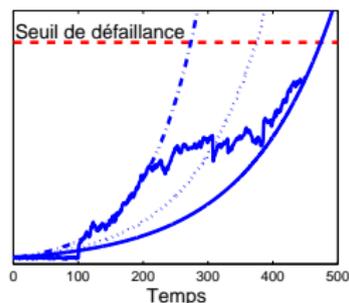
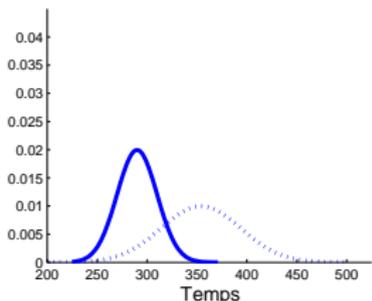
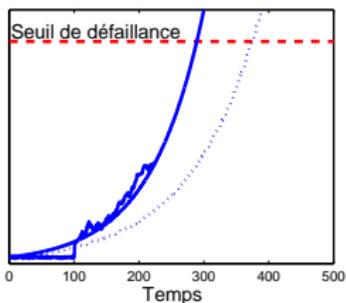
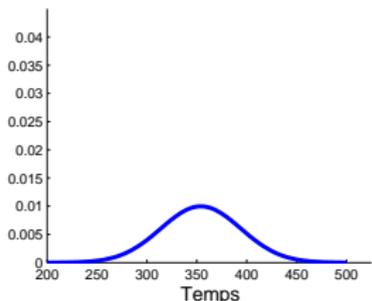
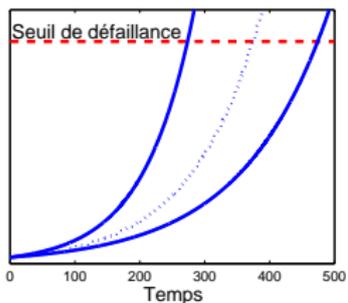
- ◇ Choix d'un seuil de défaillance
- ◇ Dégradation : processus Gamma homogène :
 - Usage normal :
$$X(d) \sim Ga(\alpha_1 \cdot d, \beta_1)$$
 - Usage stressé :
$$X(d) \sim Ga(\alpha_2 \cdot d, \beta_2)$$
 - Dégradation moyenne plus élevée en usage stressé :
$$\alpha_1 \cdot \beta_1 < \alpha_2 \cdot \beta_2$$
- ◇ Quantification de la qualité du modèle de dégradation.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Modélisation de la défaillance basée sur la dégradation
- 3 Estimation de la durée de vie résiduelle**
- 4 Prise de décision en maintenance - approche prédictive
- 5 Conclusion

Durée de vie résiduelle (*“Remaining Useful Lifetime - RUL”*)

◇ Définition : durée qui reste à un système avant défaillance.



Estimation de la durée de vie résiduelle

◇ (X_1, \dots, X_n) : états du système ; Θ : conditions d'usage.

◇ Défaillance par dégradation :

- Niveau dégradation dépasse un seuil L .
- Fiabilité :

$$R_{\Theta}(t \mid X_1, \dots, X_n) = P_{\Theta}(X(t) < L \mid X_1, \dots, X_n)$$

◇ Défaillance par causes concurrentes (choc et dégradation) :

- Niveau dégradation dépasse un seuil L .
- Suite à un choc à T_S .
- Fiabilité :

$$R_{\Theta}(t \mid X_1, \dots, X_n) = P_{\Theta}((X(t) < L) \cap (T_S > t) \mid X_1, \dots, X_n)$$

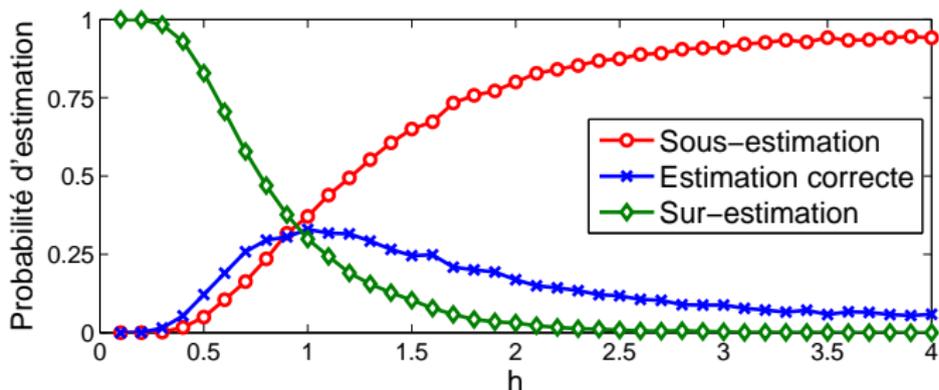
Modèle à effet de stress permanent - RUL

- ◇ Le processus de dégradation dépend du nombre de chocs.
- ◇ L'évaluation de la RUL nécessite de connaître le nombre de chocs n ayant lieu avant l'instant actuel t_0 .
- ◇ Etat normal :
 - Pas de chocs.
 - Estimation du nombre de chocs précédents cet état à travers $(\alpha, \beta) = (\alpha_1 \cdot \tau^n, \beta_1)$.
 - Méthode du maximum de vraisemblance ou méthode des moments.
- ◇ Etat stressé :
 - Nombre de chocs précédents estimé.
 - Détection des chocs lors du fonctionnement.
 - Méthode de somme cumulée ("*CUmulative SUM - CUSUM*").

- ◇ Méthode de somme cumulée (*CUSUM*) : détection de changement de mode à $t = N \cdot \Delta T$:

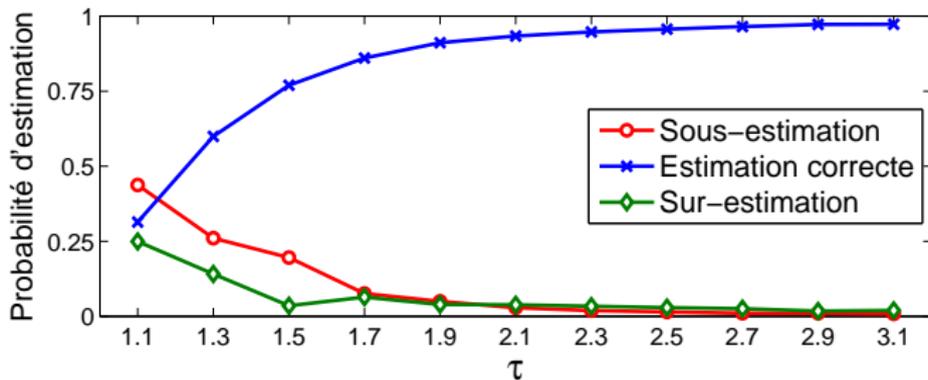
$$N = \min\{m \geq 1, \max_{1 \leq k \leq m} \sum_{i=k}^m \log \frac{f_T(\Delta X_i, \alpha_2 \Delta T, \beta_2)}{f_T(\Delta X_i, \alpha_1 \Delta T, \beta_1)} \geq h\}$$

- ◇ Heuristique : application de la méthode de CUSUM par fenêtres.
- ◇ Optimisation de h en maximisant la probabilité d'estimation correcte :



Exemple d'optimisation de h pour $\tau = 1.1 - (\alpha_2, \beta_2) = (2, 1)$

- ◇ Etude de la performance de détection :



Exemple de probabilité d'estimation - $(\alpha_2, \beta_2) = (2, 1)$

- ◇ Etude de l'impact sur la RUL \Rightarrow méthode efficace.

Calcul analytique de la RUL

$$R_{\Theta}(t|X(t_0) = x_0) = F_{\Theta}(L - x_0) = \int_0^{L-x_0} f_{\Theta}(x) dx$$

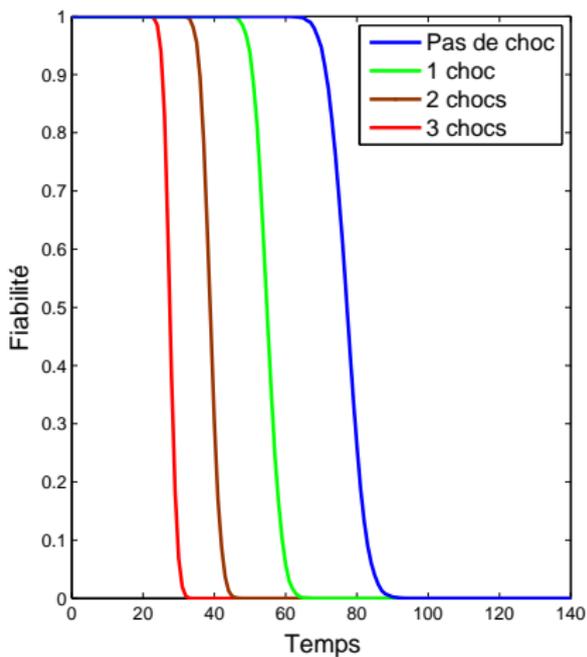
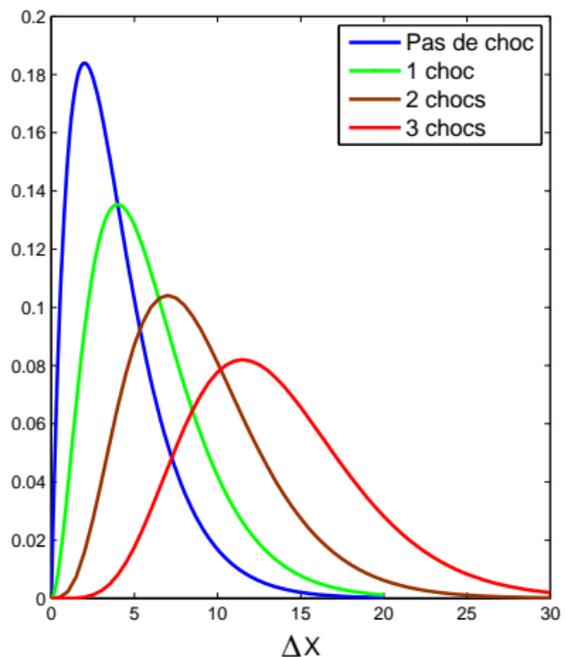
$$\begin{aligned} f_{\Theta}(x) &= g(x) \cdot P(\text{pas de choc avant } t) + \int_{T_1}^t f^{c_1}(x) \cdot P(\text{1}^{\text{er}} \text{ choc à } c_1(< t)) dc_1 \\ &= g(x) \cdot \exp(-\lambda(t - T_1)) + \int_{T_1}^t f^{c_1}(x) \cdot \lambda \cdot \exp(-\lambda(c_1 - T_1)) dc_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f^{c_1}(x) &= (f_1 \star f_2 \star f_3)(x) \cdot P(\text{2}^{\text{ème}} \text{ choc après } t | \text{1}^{\text{er}} \text{ choc à } c_1) \\ &\quad + \int_{c_1}^t f^{c_2}(x) \cdot P(\text{2}^{\text{ème}} \text{ choc à } c_2(< t) | \text{1}^{\text{er}} \text{ choc à } c_1) dc_2 \\ &= (f_1 \star f_2 \star f_3)(x) \cdot \exp(-\lambda(t - c_1)) + \int_{c_1}^t f^{c_2}(x) \cdot \lambda \cdot \exp(-\lambda(c_2 - c_1)) dc_2 \end{aligned}$$

⋮

$$f^{c_n}(x) = (f_1 \star f_2 \star f_3 \cdots \star f_{n+2})(x) \cdot \exp(-\lambda(t - c_n)) + \int_{c_n}^t f^{c_{n+1}}(x) \cdot \lambda \cdot \exp(-\lambda(c_{n+1} - c_n)) dc_{n+1}$$

Mise à jour de la RUL en fonction du nombre de chocs



Plan

- 1 Introduction
- 2 Modélisation de la défaillance basée sur la dégradation
- 3 Estimation de la durée de vie résiduelle
- 4 Prise de décision en maintenance - approche prédictive**
- 5 Conclusion

Prise de décision en maintenance

- ◇ Structure de décision de maintenance prédictive basée sur les informations de surveillance pour la planification des
 - Inspections (si surveillance discrète).
 - Remplacements préventifs (RP).

- ◇ Présentation de deux contributions :
 - Surveillance discrète en absence de covariables.
⇒ Planification des inspections et des RP.

 - Surveillance continue avec prise en compte de covariables, de contraintes de maintenance et d'informations limitées.
⇒ Planification des RP en respectant ces contraintes.

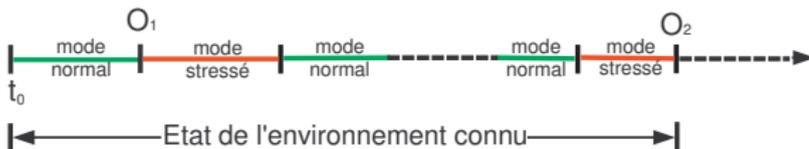
Surveillance continue avec prise en compte de covariables, de contraintes de maintenance et d'informations limitées

- ◇ Système surveillé d'une manière **continue**.
→ Véhicule avec un composant critique.

- ◇ Les **covariables** influencent l'évolution de l'état du système.
→ charge du véhicule, type de route, etc.

- ◇ Les opérations de maintenance peuvent être planifiées uniquement à des **opportunités de maintenance**.
 - Domaines de transport, aéronautique, nucléaire, systèmes off-shore, etc.
 - Contraintes de disponibilité, contraintes techniques, etc.
 - Cas d'un véhicule : ateliers spécifiques.

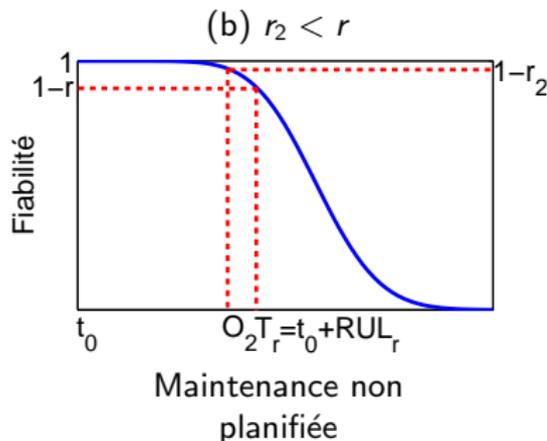
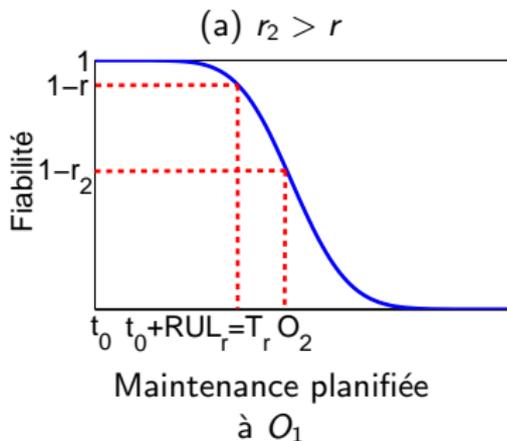
◇ Horizon de visibilité fini :



- ◇ Pronostic sur l'horizon de visibilité \Rightarrow Approche prédictive.
- ◇ Horizon roulant \Rightarrow Mise à jour de la décision de maintenance.
- ◇ Choix d'une structure de décision de maintenance cohérente qui prend en compte les contraintes.
- ◇ Choix des informations à utiliser pour la décision et la manière de les prendre en compte.
- ◇ Quatre politiques de maintenance : 2 politiques prédictives (proposées) et 2 politiques de référence.

Politique basée sur le risque

- ◇ La probabilité de défaillance ne doit pas excéder un risque r (à optimiser).
- ◇ Le pronostic est utilisé d'une manière directe dans la prise de décision.
- ◇ Remplacement préventif à O_1 si $r_2 > r$:

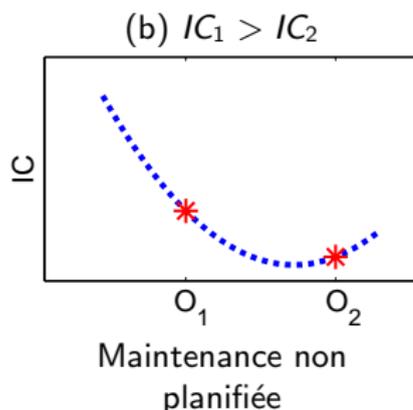
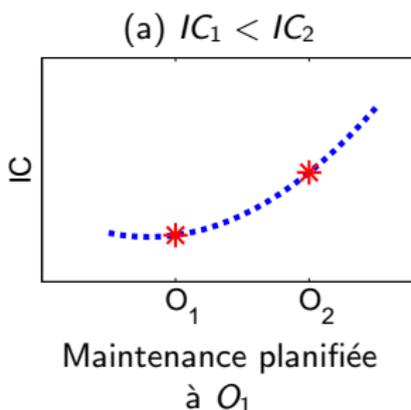


Politique basée sur le coût

- ◇ Indicateur Coût IC qui représente le coût moyen si un remplacement préventif est planifié à une certaine opportunité.

$$\text{A } t_i : IC_{i+1} = \frac{C}{DV} = \frac{C_p \cdot R(t_{i+1}) + C_c \cdot F(t_{i+1}) + \int_{t_i}^{t_{i+1}} C_d(t)f(t)dt}{t_{i+1} - \int_{t_i}^{t_{i+1}} F(t) dt}$$

- ◇ Remplacement préventif à O_1 si $IC_1 < IC_2$:



Politiques de référence

- ◇ Maintenance basée sur l'âge :
 - Approche statique considérant uniquement l'état binaire du système (marche/panne) et son âge.
 - Remplacement préventif à la dernière opportunité de maintenance avant un âge T (à optimiser).

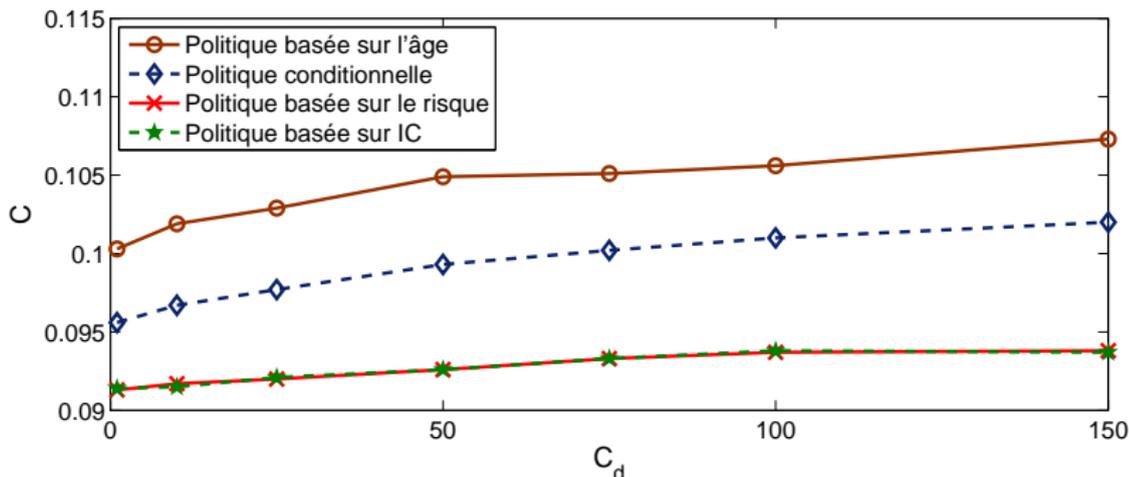
- ◇ Maintenance conditionnelle :
 - Approche dynamique considérant l'état précis (dégradation) du système.
 - Remplacement préventif à une opportunité si le niveau de dégradation dépasse un seuil M (à optimiser).

Analyse des performances des politiques

- ◇ Deux modes de fonctionnement normal/stressé.
- ◇ Dégradation : processus Gamma homogène en fonction de la distance parcourue d pour chacun des modes de fonctionnement :
 - Mode normal : $Ga(\alpha_1 \cdot d, \beta_1)$.
 - Mode stressé : $Ga(\alpha_2 \cdot d, \beta_2)$.
 - Dégradation moyenne plus élevée en usage stressé :
 $\alpha_1\beta_1 < \alpha_2\beta_2$.
- ◇ Au moins deux opportunités de maintenance sur l'horizon de visibilité.

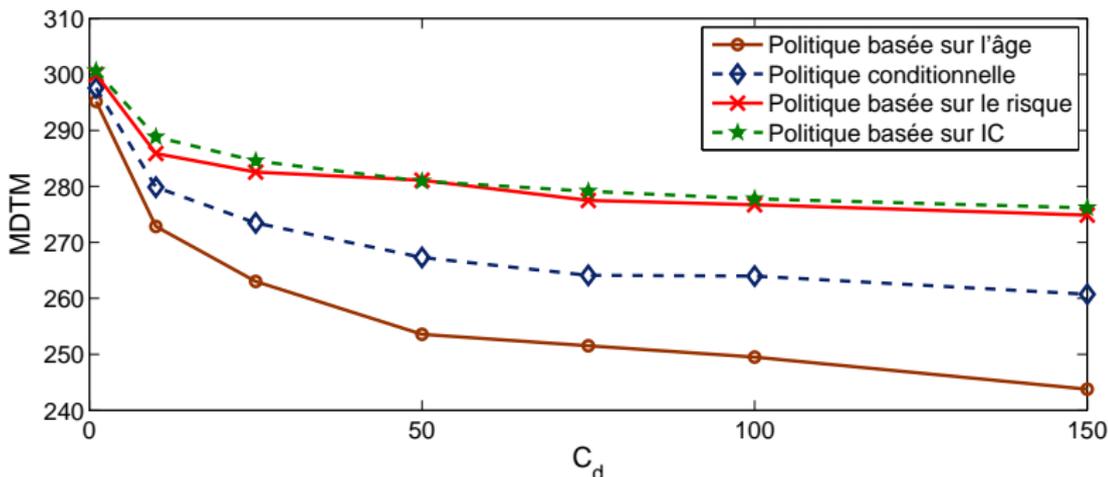
- Comparaison sur la base de :
 - Coût moyen par unité de distance.
 - Distance moyenne avant maintenance (*Mean Distance Till Maintenance - MDTM*).
- Coûts considérés :
 - C_p : Coût de remplacement préventif.
 - $C_c (> C_p)$: Coût de remplacement correctif.
 - C_d : Coût par unité de distance relatif au déplacement de l'équipe et de la plate-forme mobile de réparation.

Variation du coût asymptotique moyen par unité de distance (C) en fonction de C_d pour les différentes politiques de maintenance



$(\alpha_1, \beta_1) = (0.5, 0.5)$, $(\alpha_2, \beta_2) = (0.75, 0.5)$, $C_p = 25$ et C_d varie de 1 à 150.

Variation de la distance moyenne avant maintenance (MDTM) en fonction de C_d pour les différentes politiques de maintenance



$(\alpha_1, \beta_1) = (0.5, 0.5)$, $(\alpha_2, \beta_2) = (0.75, 0.5)$, $C_p = 90$ et C_d varie de 1 à 150.

Comparaison des politiques prédictives

Opportunité plus proches :

C_d	C_{IC}	C_R	G_C	$MDTM_{IC}$	$MDTM_R$	G_{MDTM}
10	0.0331	0.0339	2.45%	304.08	307.5931	1.14%
25	0.0332	0.0340	2.34%	303.34	307.5734	1.40%

$Envt \sim U(40, 80)$, $Opp. \sim U(3, 7)$, $L = 100$, $(\alpha_1, \beta_1) = (0.5, 0.5)$,
 $(\alpha_2, \beta_2) = (0.75, 0.5)$, $C_c = 100$ et $C_p = 25$.

Coûts différents selon l'opportunité de maintenance :

Envt	Opp.	C_c	$C_p C_c^{-1}$	$C_d C_c^{-1}$	C_{IC}	C_R	G_C
$U(40, 80)$	$U(25, 40)$	$U(80, 100)$	0.1	0.1	0.0348	0.0328	-6.10%
$U(70, 90)$	$U(50, 70)$	$U(80, 100)$	0.1	0.1	0.0394	0.0376	-4.79%
$U(70, 90)$	$U(50, 70)$	$U(90, 100)$	0.1	0.1	0.0406	0.0396	-2.53%
$U(90, 100)$	$U(70, 80)$	$U(90, 100)$	0.1	0.1	0.0497	0.0496	-0.20%
$U(90, 100)$	$U(70, 80)$	$U(90, 100)$	0.9	0.1	0.4121	0.4136	+0.36%

$L = 100$, $(\alpha_1, \beta_1) = (0.5, 0.5)$ et $(\alpha_2, \beta_2) = (0.75, 0.5)$.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Modélisation de la défaillance basée sur la dégradation
- 3 Estimation de la durée de vie résiduelle
- 4 Prise de décision en maintenance - approche prédictive
- 5 Conclusion

Conclusion

- ◇ Nécessité de développements méthodologiques en terme de modélisation pour la prise de décision en maintenance.
- ◇ Trois aspects :
 - ① Modélisation de la défaillance basée sur la dégradation :
 - Adaptation/modification/développement de modèles de défaillance basée sur la dégradation.
 - Différents comportements de la dégradation et mécanismes de défaillance.
 - Modèle à effet de stress permanent.
 - Traitement de données réelles : cas de l'huile moteur.

Conclusion

- ② Estimation de la durée de vie résiduelle :
 - Calcul analytique pour les différents modèles considérés.
 - Utilisation de méthodes statistiques complémentaires : estimation, mise à jour bayésienne, CUSUM.
- ③ Prise de décision en maintenance - approche prédictive :
 - Plusieurs cas de figure : type de surveillance, impact de l'environnement, contraintes, etc.
 - Planification des inspections et des remplacements préventifs.
 - Comparaison des performances et quantification des gains.
 - Meilleures performances pour les politiques prédictives.

D'un point de vue MoDe :

- ◇ L'étude menée montre l'intérêt de la prise en compte des données de surveillance, de leur traitement et intégration dans la prise de décision en maintenance.
 - Développement des technologies et des techniques de surveillance, d'analyse et de traitement des données, de communication sans fil, etc.

- ◇ Cas témoin de l'huile moteur qui
 - montre que les modèles "théoriques" peuvent décrire le comportement d'un composant dans la pratique,
 - confirme l'intérêt de faire des mesures sur les autres composants critiques identifiés.

Merci pour votre attention !

