

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

Estimation de la durée de vie des pièces caténaire

Carolina MEIER-HIRMER

SNCF - Direction de l'Infrastructure

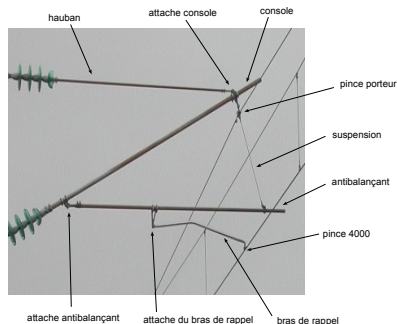
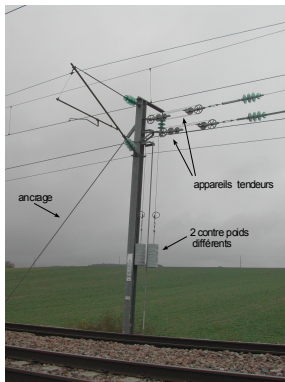
FIMA - 30 avril 2009



Quelques chiffres

- Plus de 10 pièces par poteau ;
- Espacement des poteaux : 50 m ;

⇒ 16 000 poteaux sur la ligne TGV Paris-Lyon.



Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

- Quantité importante de pièces à maintenir ;
- Sollicitation élevée sur les lignes à grande vitesse ;
- Faible prix des pièces ;
- Coûts des inspections et des remplacements à l'unité très importants ;
- Incidents caténaire : fort impact sur la régularité (450 000 min de retard en France, Allemagne et Italie).



Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

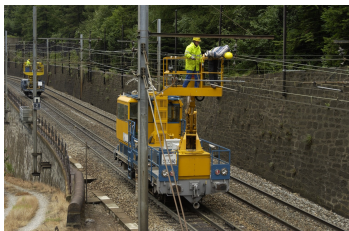
Données

Modèle

Conclusion

PDMP

- Basée sur l'exploitation du retour d'expérience et sur l'expertise ;
- Maintenance corrective et préventive
 - surveillance ;
 - révision périodique.



● Inspections

- à pied ;
- à partir de la cabine ;
- à l'aide d'une voiture de mesure ;
- à l'aide d'un véhicule spécial ;

● Prises de mesures

- Visites Détaillées ;
- Révisions Périodiques.

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

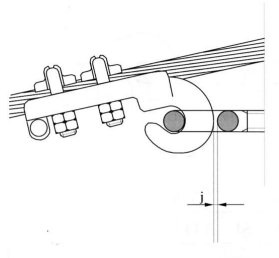
Données

Modèle

Conclusion

PDMP

- Sont concernés :
 - le jeu entre deux composants ;
 - l'usure ;
 - l'épaisseur (des fils) ;
- Pour chaque pièce, il existe une variable décrivant par des classes la dégradation :
 - VO** Valeur Objectif ;
 - VA** Valeur d'Alerte ;
 - VI** Valeur d'Intervention.



Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

Les méthodes choisies dépendent des données disponibles :

- ① Nombre de pièces remplacées \Rightarrow **méthodes liées aux chaînes de MARKOV ;**
- ② État des pièces lors des inspections \Rightarrow **méthodes d'analyse de durées de vie pour des données censurées.**

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

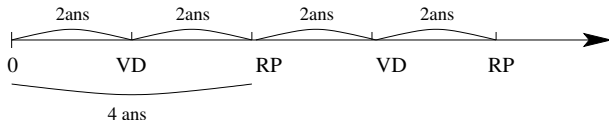
Modèle

Conclusion

PDMP

Étude 1

Données disponibles :
Nombre de pièces remplacées



- **Visites détaillées** : ajout des pièces en VA au cahier des charges ;
- Toutes les autres visites : remplacement des pièces en VI.
- **Révisions périodiques** : remplacement des pièces en VI et
 - ① remplacement des pièces répertoriées dans le cahier des charges ;
 - ② remplacement de toutes les pièces en VA.

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

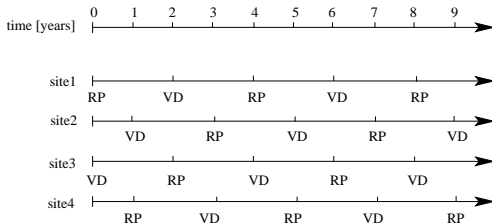
Données

Modèle

Conclusion

PDMP

Planification des actions de maintenance :



- division de la section en 4 lots ;
- RP et VD sont effectuées sur un lot par ans ;

⇒ l'information issue des RP concerne 1/4 de la population installée,

⇒ l'information des remplacements en VI concerne toutes les pièces.

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

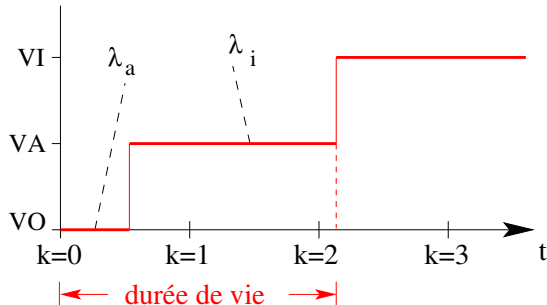
PDMP

- Nombre annuel de pièces remplacées entre 1998 et 2003
 - pendant une RP ;
 - en dehors des RP.
- Nombre de pièces installées estimé à partir des longueurs des lignes :

Nom	Année de la pose	Longueur en km	Nombre de poteaux
Paris – Sud-Est LN1	1981/83	381	15 240
Paris – Atlantique LN2	1989/90	284	11 360
Nord-Europe LN3	1993/94	386	15 440
Contournement Lyon LN4	1992/94	113	4520
Méditerranée LN5	2001	220	8800

Hypothèse du modèle :

La dégradation d'une pièce est décrite par un processus markovien de sauts.



Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

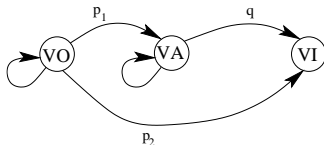
Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP



Structure décrivant l'évolution des pièces **sans** remplacement

- Le remplacement lors d'une RP dépend de l'état de la pièce lors de la précédente VD
 \Rightarrow le processus $X_{k,k \in \mathbb{N}}$ n'est pas markovien ;
- Définition de \tilde{X}_k :

$$\tilde{X}_k := \begin{pmatrix} X_{k-1} \\ X_k \end{pmatrix};$$

- \tilde{X}_k est markovien, mais pas homogène
 \Rightarrow existence de deux matrices de transition.

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

- L'âge des pièces n'est pas connu
⇒ hypothèse : les données décrivent le régime stationnaire du processus ;

- Les statistiques suffisantes sont utilisées :

$$S^{nRP} := \frac{1}{6} \sum_{i=1998}^{2003} \frac{1}{N} Y_i^{(1)} \quad S^{RP} := \frac{4}{6} \sum_{i=1998}^{2003} \frac{1}{N} Y_i^{(2)},$$

où $Y_i^{(1)}$ (resp. $Y_i^{(2)}$) est le nombre de pièces remplacées en VI entre deux RP (resp. lors d'une RP).

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

Calcul

- des deux matrices de transition ;
- de la loi stationnaire, dépendante de p_1 , p_2 et q ;
- des taux de remplacement τ_{nRP} et τ_{RP} :

$$\tau_{nRP} = p_2 \pi(X_{RP} = VO) + q \pi(X_{RP} = VA)$$

- où τ_{nRP} est estimé par S^{nRP} et τ_{RP} par S^{RP} ;
- des relations entre la loi stationnaire et les taux de hasard λ_a et λ_i :

$$P[X_\delta = VO] = e^{-\lambda_a \cdot \delta} = 1 - p_1 - p_2 ;$$

Résolution numérique

- par rapport aux λ_a et λ_i ;
- de la durée de vie par rapport à λ_a et λ_i (addition de deux temps de séjour).

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

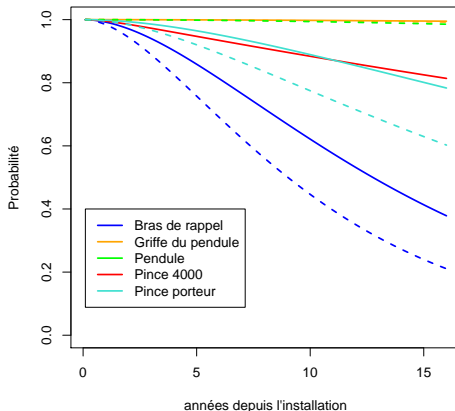
Données

Modèle

Conclusion

PDMP

Fiabilité sur la LN2



- Courbe lisse : résultats du modèle présenté, courbe pointillée : résultats sous l'hypothèse que toutes les pièces en VA sont remplacées lors d'une RP \Rightarrow bornes pour la fiabilité.

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

Étude 2

Données disponibles :
Durée d'installation pour chaque pièce

Feuille de maintenance (sous forme papier) :

N° SUPPORT	Demi bride a anneau	BR	Attache B R	Attache Anti / Console	Attache console	pièce 4000	Encombrement + Anti LFC	connexion 75	connexion 115	Usure FC coté entreevoile	Usure FC coté champ	observations
49/06	SI	VO	VO	VO	VO	VO	400					
Pendulage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Griffe haut	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO					
Griffe bas	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO					
49/08	VA	VO	VO	VO	VO	VO	370			VO		
Pendulage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Griffe haut	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO				
Griffe bas	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO				
49/10	SI	VO	VO	VO	VO	VO	400					- 70
Pendulage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Griffe haut	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO			

- Le numéro du support permet l'identification de chaque pièce ;
- Feuilles remplies différemment par les agents de maintenance.

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

49/01	VO			VO			100				
Pendulage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Griffe haut	VO	✓	VO	VIA	VO	VO					
Griffe bas	VO	0	VO	VA	VO	VO					
49/03	VO			VO							
Pendulage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Griffe haut	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO				
Griffe bas	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO				

W	VO			VO							
Pendulage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Griffe Saut	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO				
Griffe bas	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO				
fy/o	uo			VO		M	p'l				
Pendulage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Griffe haut	uo	VO	VO	VO	VO	VO	VO				
Griffe bas	VO	VO	VO	VO	VO	VO	VO				

⇒ Les données ont du être saisies manuellement.

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

- Pour chaque visite VDEC, l'état (VO, VA, VI) est disponible ;
- Numéro du support connu \Rightarrow l'âge des pièces installées peut être calculé :

Poteau	date de l'inspection	état
110/02	15/04/2002	VO
110/02	12/09/2004	VA
110/04	15/04/2002	VO

- Méthodes d'estimation des durées de vie :
 - Loi exponentielle/Weibull/lognormale ;
 - Estimation sans a priori sur la forme de la distribution.

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

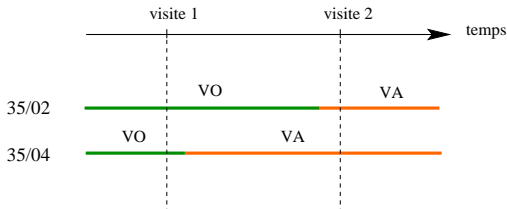
Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP



- Deux dates de pannes différentes, mais la même observation.
- La vraie date se trouve entre :

$[visite1 ; visite2]$

et la taille de cet intervalle est importante \Rightarrow ne peut pas être ignorée.

\Rightarrow Les données sont censurées par intervalle (la date exacte de transition entre deux états n'est pas connue).

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

Cas paramétrique :

- $S(t)$ fonction de survie, fiabilité
 L_i, R_i bornes de l'intervalle observé pour l'individu i
 θ paramètres d'intérêt

$$L(\theta) = \prod_{i \in \text{intervalle}} [S(L_i) - S(R_i)] \prod_{j \in \text{droite}} S(L_j).$$

Cas non-paramétrique :

- τ_0, \dots, τ_m bornes des intervalles observés, triées
 $l(i), r(i)$ indice qui donne le τ pour chaque individu
 $F(\tau_j)_{j=1}^m$ fonction de répartition discrétisée
 (paramètre d'intérêt)

$$\mathcal{L}_n(F) = \sum_{i \in \text{individu}} \ln(F_{r(i)} - F_{l(i)});$$

- Problème : la discrétisation change avec les observations.

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

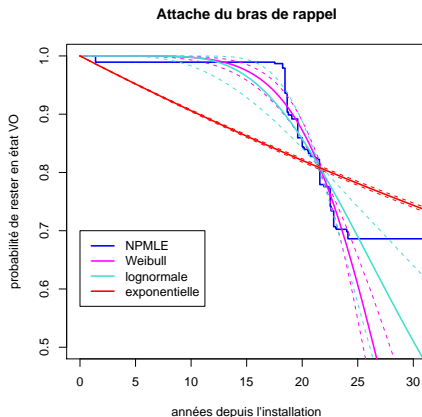
Données

Modèle

Conclusion

PDMP

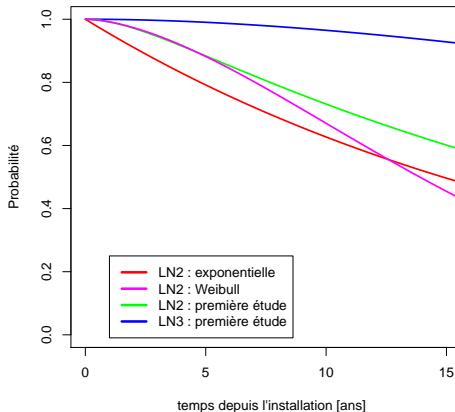
Probabilité de ne pas sortir de l'état VO
en fonction du temps d'installation



- La distribution de WEIBULL est satisfaisante.

Probabilité de ne pas atteindre VI en fonction du temps d'installation

Fiabilité : Pince 4000



● Les résultats des deux méthodes sont proches.

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

Calcul des coûts asymptotique de maintenance en fonction du cycle de régénération :

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\text{IEC}(t)}{t} &= \frac{1}{T} (c_f \cdot T + X + c_u \cdot \text{IE}(N(T))) \\ &= c_f + \frac{X}{T} + c_u \cdot \frac{\int_0^T H(s) \, ds}{T} \end{aligned}$$

T	cycle de régénération
c_f, c_u, X	coût fixe, coût unitaire, coût de régénération
$N(t)$	fonction de comptage
$H(t)$	densité de renouvellement

Coûts de maintenance en fonction du cycle de régénération

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

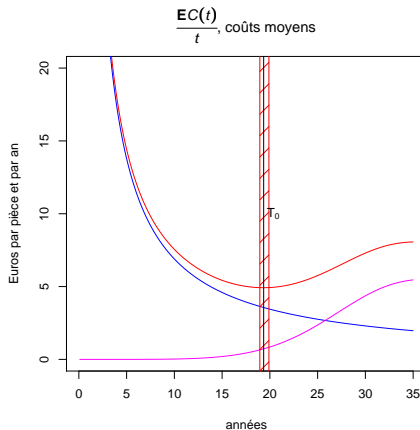
Conclusion

PDMP

coût moyen de
régénération

coût de remplacement
hors régénération

somme des coûts
incluant les coûts fixes



- Le cycle optimal T_0 se trouve autour de 20 ans pour cette pièce.

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

La première étude

- a conduit à la numérisation du REX ;
- donne des résultats raisonnables.

La deuxième étude

- confirme les résultats de la première étude ;
- préconise la distribution de WEIBULL ;
- permet la simulation des incertitudes sur le résultat ;
- permet l'évaluation du cycle optimal de régénération.

⇒ nous disposons de données d'entrée pour une évaluation économique de la maintenance.

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

Problème : comment évaluer la durée de vie d'un support \Rightarrow jusqu'à maintenant utilisation du minimum des durées de vie. Mais

- l'âge (l'usure) d'une pièce peut impacter la durée de vie d'une autre pièce (cas typique : remplacement d'une seule pièce du support) ;
- la défaillance d'une seule pièce ne conduit pas forcément à la rupture de la caténaire ;
- la combinaison de plusieurs pièces usées peut conduire à une rupture de caténaire.

\Rightarrow recherche d'une méthode adaptée pour déterminer la fiabilité du système.

Contexte

Maintenance actuelle

Type de maintenance

Mesures

Interaction données - méthodes

Étude 1

Données

Modèle

Étude 2

Données

Modèle

Conclusion

PDMP

Utilisation des PDMP pour résoudre ce problème :
thèse CIFRE actuellement en cours (LAMA -
Direction de la recherche)

- dépendance fonctionnelle : analyse par l'Ingénierie ;
- corrélation des durées de vie : trois pistes
 - ① utilisation des données : estimation statistique ;
 - ② simulation mécanique par éléments finis : sollicitation → usure ;
 - ③ analyse métallurgique des pièces usées.

en même temps : surveillance des zones de test.