

# Regroupement optimisé de tâches de maintenance d'un système multi-composant à dégradation graduelle

19 octobre 2009

Réunion du GT S3 du GDRMACS, ENSAM Paris

K. Bouvard

Laboratoire d'Automatique de Génie Informatique et Signal - UMR CNRS 8146, Lille, France &  
Volvo Technology, Lyon, France

S. Artus

Volvo Technology, Lyon, France

C. Bérenguer

ICD/Laboratoire de Modélisation et Sûreté des Systèmes, Troyes, France

V. Cocquempot

Laboratoire d'Automatique de Génie Informatique et Signal - UMR CNRS 8146, Lille, France

# Plan de la présentation

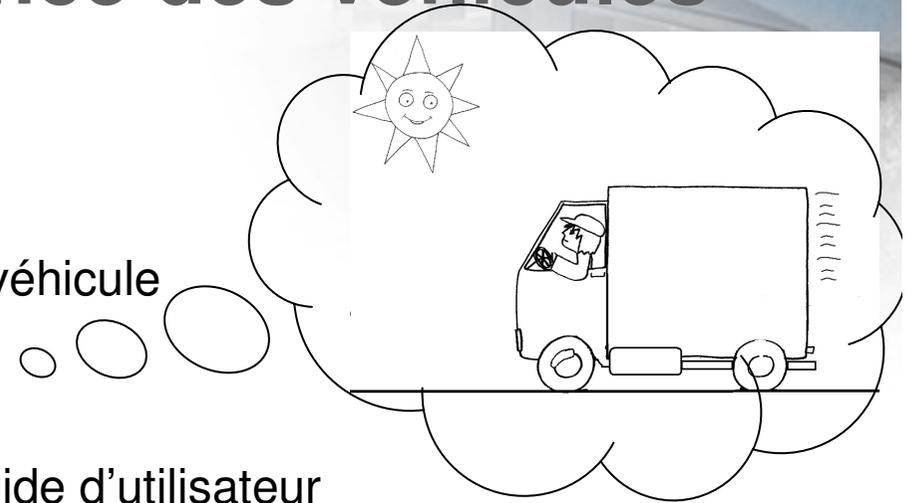
- Contexte
- Problématique
- Objectif
- Méthode de planification avec un horizon roulant
- Méthode de planification adaptative avec un horizon roulant
- Exemples numériques
- Conclusion



# Contexte: La maintenance des véhicules industriels

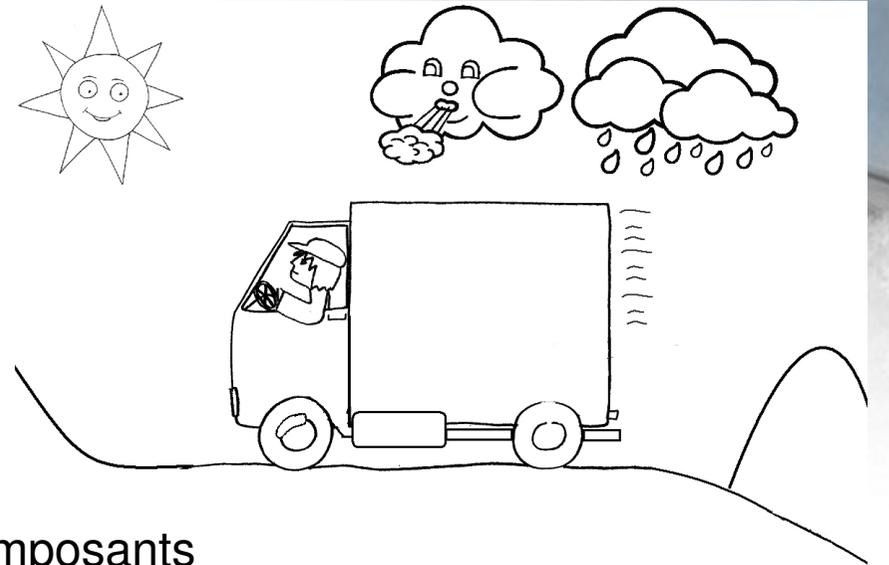
- A l'achat du véhicule
  - Détermination d'une configuration du véhicule
  - Spécification de l'usage espéré
- Planning de maintenance basée sur le guide d'utilisateur
  - Maintenance préventive systématique
    - Intervalles de maintenance fixés à l'avance
    - Groupes de composants à maintenir définis à l'avance

→ planning adapté pour des véhicules de même configuration et de même usage espéré



# Problématique

- Usage espéré  $\neq$  Usage réel
- Planning de maintenance non adapté
- Conséquence:
  - Usage plus sévère
    - Multiplication de défaillances de composants
    - Immobilisation du véhicule
    - Augmentation du coût de maintenance du véhicule avec les remplacements correctifs
  - Usage plus souple
    - « Gaspillage » de composants!
    - Possibilité de réduire le coût de maintenance du véhicule en évitant les remplacements précoces.



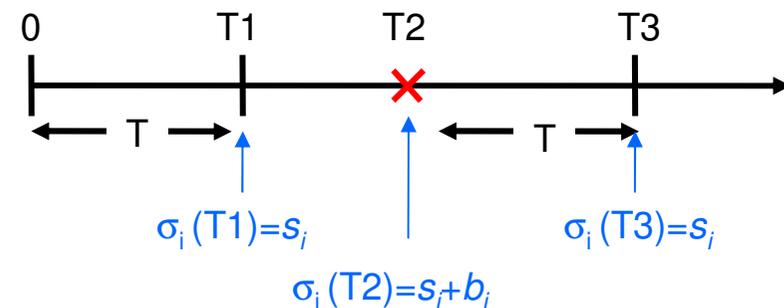
# Objectif

- Objectif: adapter la planification des opérations de maintenance aux conditions d'utilisation réelles et minimiser le coût de maintenance du véhicule.
- Véhicule
  - Système multi-composant
  - Composants à dégradation graduelle
- Méthode de planification
  - Basée sur une méthode d'horizon roulant
  - Planification dynamique
  - Maintenance adaptée à la dégradation des composants
  - Optimisation du coût de maintenance du système

# **Méthode de planification avec horizon roulant**

# Hypothèses

- Système
  - Multi-composant
  - Loi de probabilité de panne fixée a priori pour chaque composant
  - Remplacement basé sur l'âge pour chaque composant dès que
    - le composant atteint un âge opérationnel  $T$ , ou
    - le composant tombe en panne



- Coût d'un arrêt de maintenance
  - Coût fixe de logistique :  $S$
  - Coût spécifique:  $\sigma_i(t)$ 
    - Si à  $t$ , le composant  $i$  fonctionne ( $T_1, T_3$ )  $\rightarrow$  coût préventif  $s_i$
    - Si à  $t$ , le composant  $i$  est en panne ( $T_2$ )  $\rightarrow$  coût correctif  $s_i+b_i$   
 $b_i$  = coût additionnel correctif

# But

- Regrouper des opérations de maintenance à une même date pour réduire le coût de maintenance du système

Cas 1

Dates	D1	D2	D3
Composant 1	X		
Composant 2			X

Coût de maintenance sur [D1, D3]

$$J1 = (S + \sigma_1(D1)) + (S + \sigma_2(D3))$$

$$J1 = 2S + \sigma_1(D1) + \sigma_2(D3)$$

Cas 2

Dates	D1	D2	D3
Composant 1		X	
Composant 2		X	

Coût de maintenance sur [D1, D3]

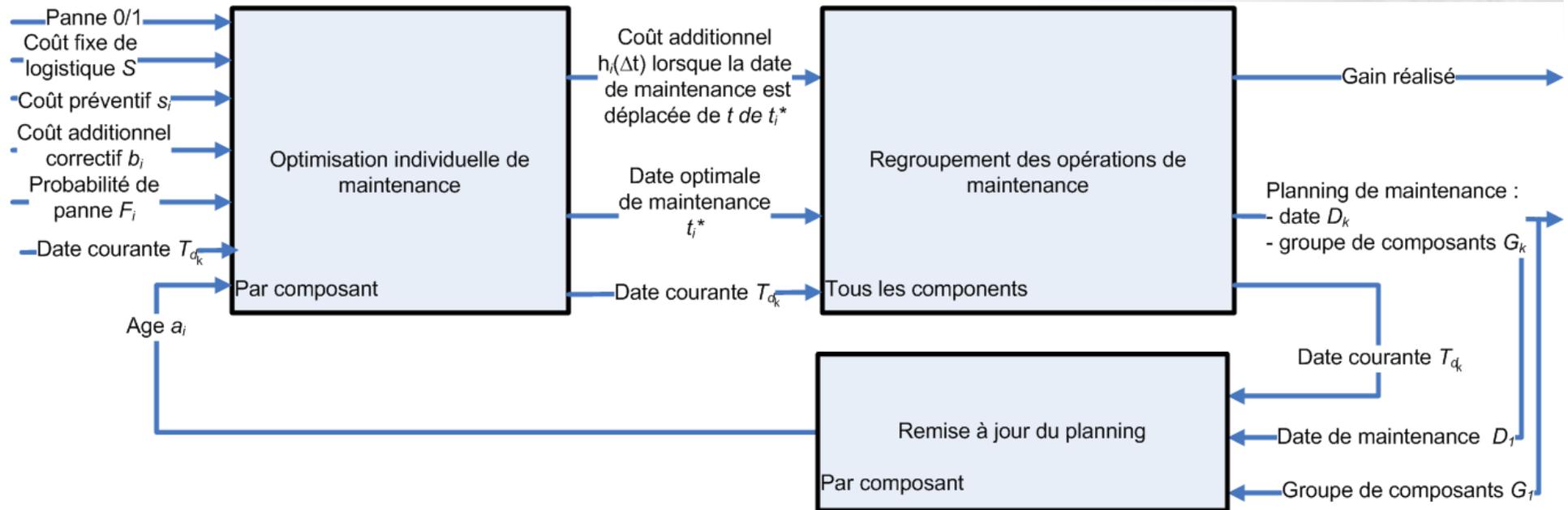
$$J2 = S + \sigma_1(D2) + \sigma_2(D2)$$

Gain =  $J1 - J2$

$$= S + [\underbrace{\sigma_1(D1) - \sigma_1(D2)}_{\text{Pénalités}}] + [\underbrace{\sigma_2(D3) - \sigma_2(D2)}_{\text{Pénalités}}]$$

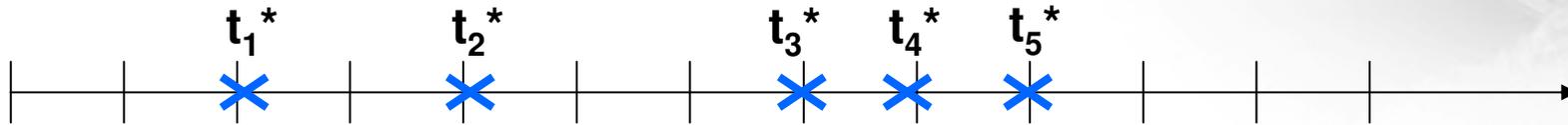
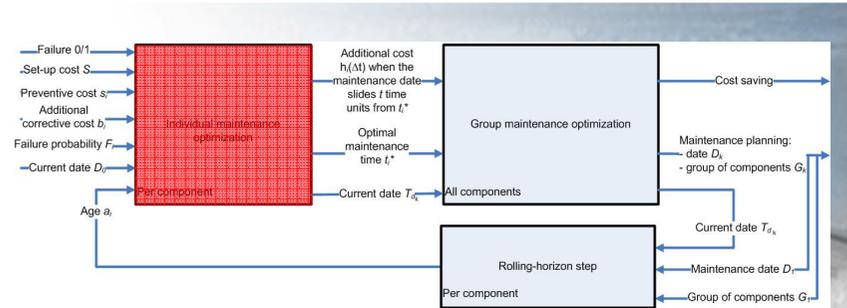
Pénalités > -S?

# Description de la méthode



(Wildeman, Dekker,98)

# Optimisation individuelle de maintenance



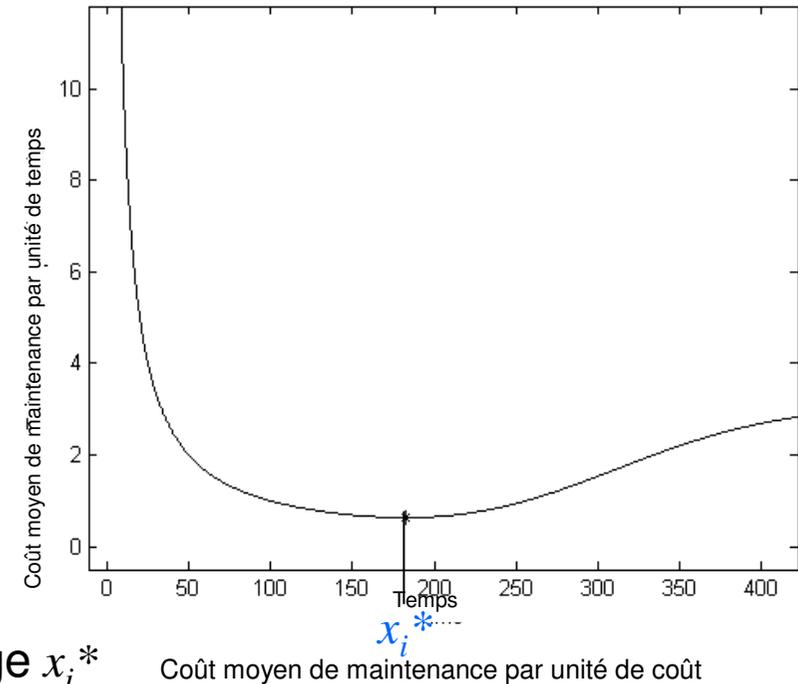
- Composants considérés indépendamment
- Calcul du coût moyen de maintenance pour chaque composant  $i$

$$C_A(T_0) = \frac{s_i + b_i \cdot F_i(T_0)}{\int_0^{T_0} (1 - F_i(t)) dt}$$

- Détermination de l'âge optimal et individuel de remplacement  $x_i^*$  tel que

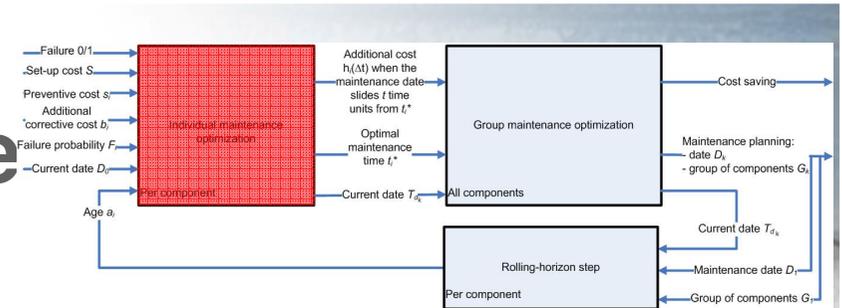
$$\frac{dC_A}{dt}(x_i^*) = 0.$$

$t_i^*$  = date à laquelle le composant  $i$  atteint l'âge  $x_i^*$



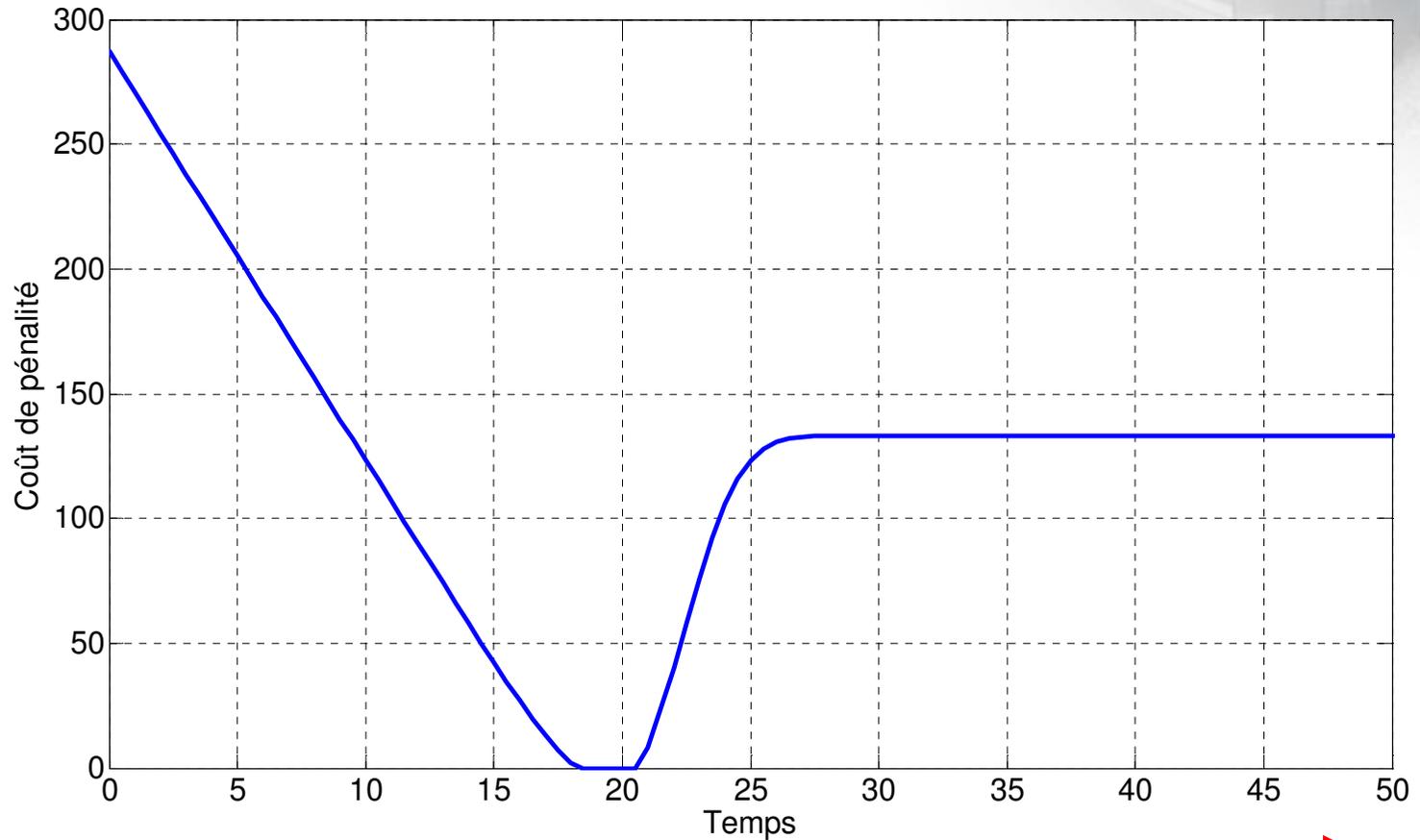
Coût moyen de maintenance par unité de coût

# Optimisation individuelle de maintenance



- Construction d'une fonction de pénalité  $h_i(t_i^* + \Delta t)$ 
  - Exprime le coût additionnel lorsque la date de maintenance du composant  $i$  est déplacée (avancée ou retardée) de  $\Delta t$  par rapport à la date optimale  $t_i^*$  de maintenance
  - Dépend de
    - $\Delta t$  temps de retard ou avancement par rapport à  $t_i^*$
    - la loi de probabilité de panne  $F_i$  du composant
    - coûts de maintenance  $s_i$  et  $b_i$  du composant
    - coût moyen optimal  $C_A(x_i^*)$
    - l'état de fonctionnement du composant  $i$  (normal, défaillant)

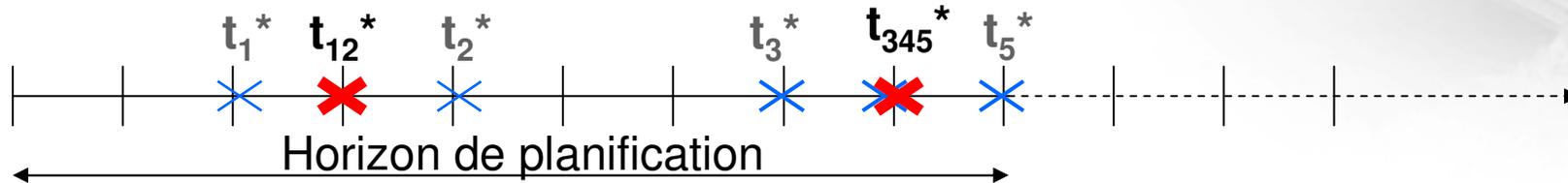
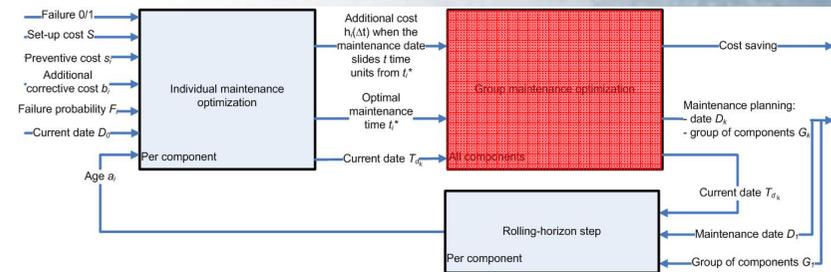
# Fonction de pénalité



← Pénalité en cas d'avancement de la date de maintenance

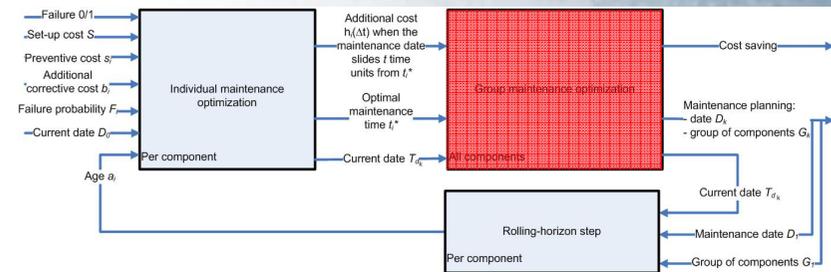
→ Pénalité en cas de retardement de la date de maintenance

# Regroupement des opérations



- Définition d'un horizon de planification  $PH = [t, \max_i(t_i^*)]$ 
  - Assez long: prise en compte de tous les composants
  - Fini: réduction de la complexité de calcul de regroupement
  - Hypothèse: 1 seule occurrence d'opération de maintenance par composant
- Utilisation d'un algorithme dynamique
  - But: Trouver la structure groupante d'opérations consécutives qui maximise les gains réalisés

# Regroupement des opérations (méthode)



- Pour chaque groupe G

- Calcul des gains réalisés

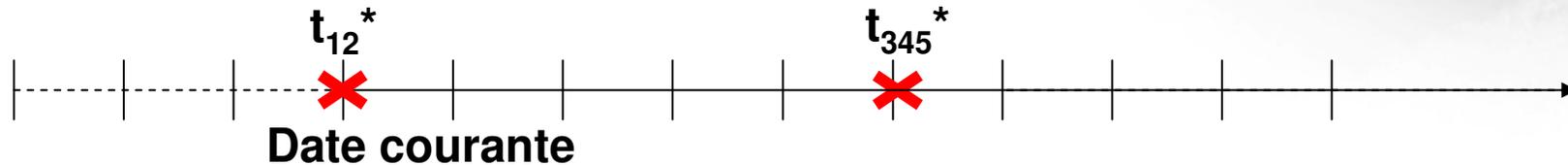
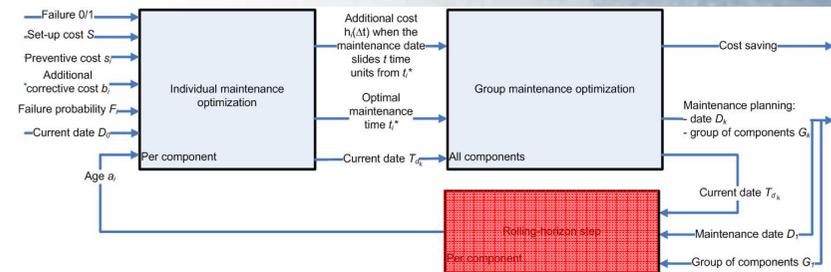
$$Gain(t) = (card(G) - 1) * S - \sum_{i \in G} h_i(t_i^* + \Delta t)$$

- Détermination de la date optimale  $t_G^*$  de maintenance du groupe G tel que

$$Gain(t_G^*) = \min_t (Gain(t))$$

- Comparaison avec les autres groupes de maintenance pour trouver la somme maximale du gain réalisé sur l'horizon de planification

# Remise à jour du planning



- Phase de remise à jour
  - Nouvelle planification à la première date de maintenance
  - Composant maintenu = composant neuf

# Limites de la méthode

- Limites
  - 1 seule occurrence d'opération de maintenance par composant sur l'horizon défini
  - Basé sur des lois de probabilités  $F_i$  fixes dans un environnement dynamique...
    - Coût moyen de maintenance
    - Age optimal de maintenance
    - Fonction de pénalité
- Amélioration
  - Intégration de plusieurs occurrences d'opération par composant sur l'horizon défini
  - Remise à jour de la loi de probabilité à partir de la dégradation initiale et un modèle de dégradation connu de composant



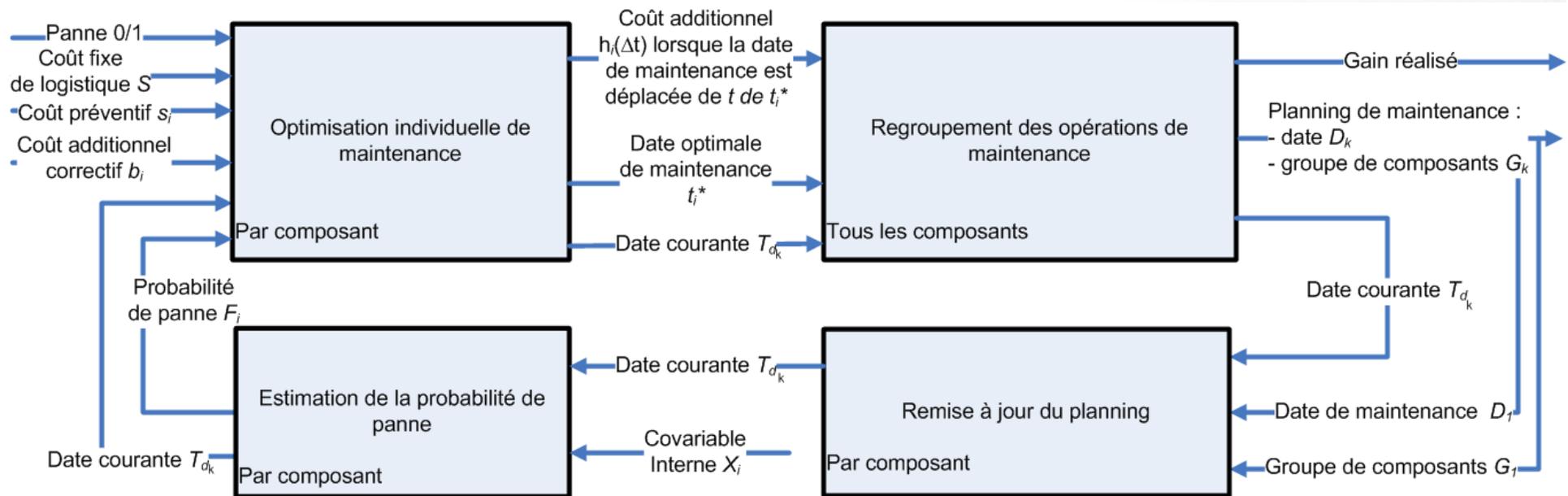
# **Méthode adaptative de planification avec horizon roulant**

# Hypothèses

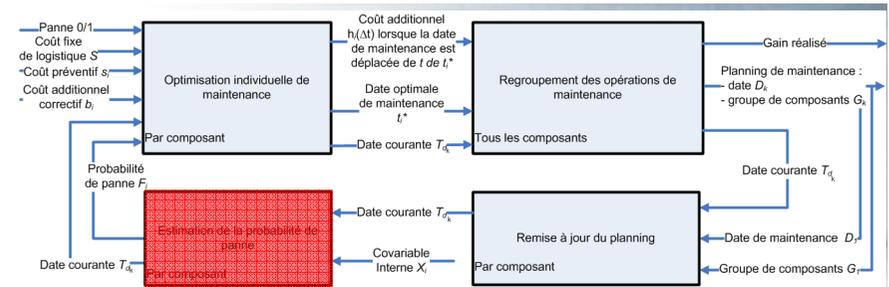
- Système
  - Multi-composant
  - Dégradation graduelle modélisée par un processus gamma de paramètres connus
  - Dispositif de récupération de mesure de dégradation disponible pour chaque composant à des dates d'inspection  $T_{dk}$
  - Remplacement basé sur l'âge pour chaque composant
- Coût d'un arrêt de maintenance
  - Coût fixe de logistique  $S$
  - Coût spécifique à l'opération  $\sigma_i(t)$ 
    - Si à  $t$ , le composant  $i$  fonctionne  $\rightarrow$  coût préventif  $s_i$
    - Si à  $t$ , le composant  $i$  est en panne  $\rightarrow$  coût correctif  $s_i + b_i$   
 $b_i =$  coût additionnel correctif

# But

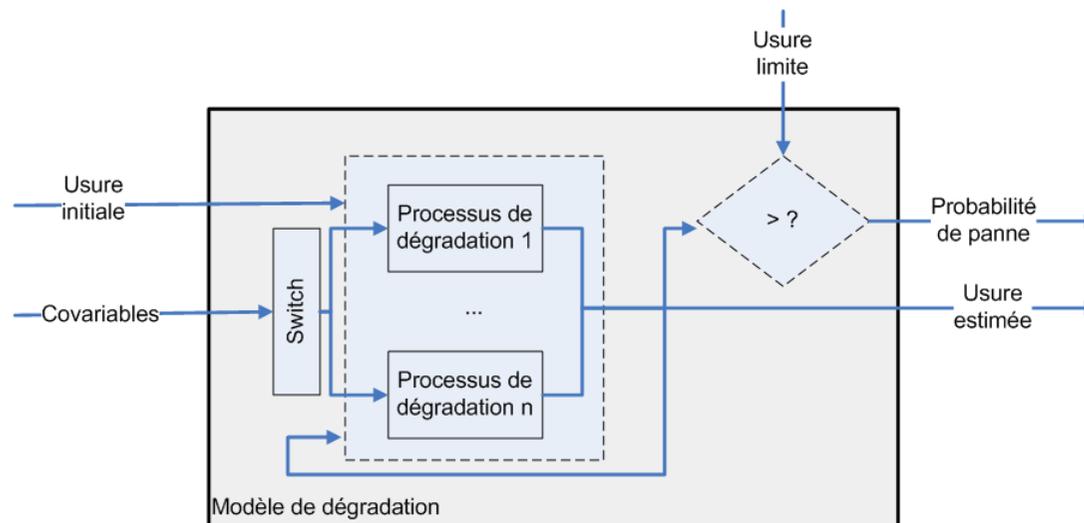
- Adapter la méthode d'horizon roulant aux dégradations réelles des composants



# Modèle de dégradation



- Basé sur les caractéristiques physiques de dégradation
- Estime le niveau de dégradation future du composant dans un environnement dynamique
- Possibilité d'intégrer des covariables qui représentent l'environnement opérationnel et les conditions d'utilisation  
Covariable = variable externe au système qui influence l'apparition de panne



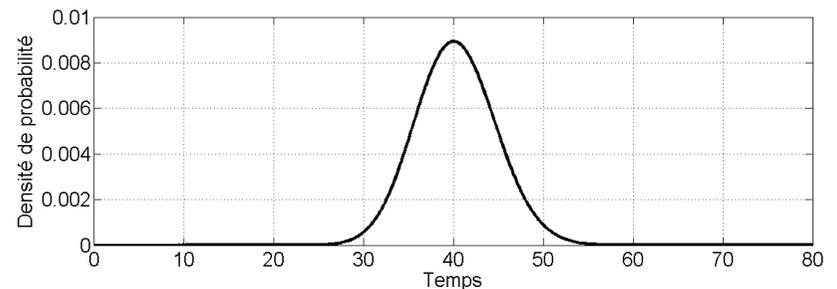
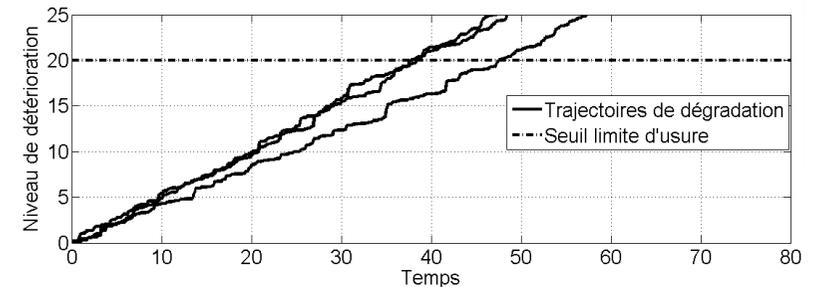
# Processus gamma

- $X(t)$ ,  $t > 0$  : processus gamma de paramètre de forme  $\alpha$  et de paramètre d'échelle  $\beta$ :
  - $X(0) = 0$ ,
  - $X(t)$  a des incréments indépendants,
  - Pour tout  $t > 0$  et  $h > 0$ ,  $X(t+h) - X(t)$  suit une distribution gamma :

$$f(x) = \frac{\beta^{-\alpha h}}{\Gamma(\alpha h)} x^{\alpha h - 1} e^{-x/\beta}$$

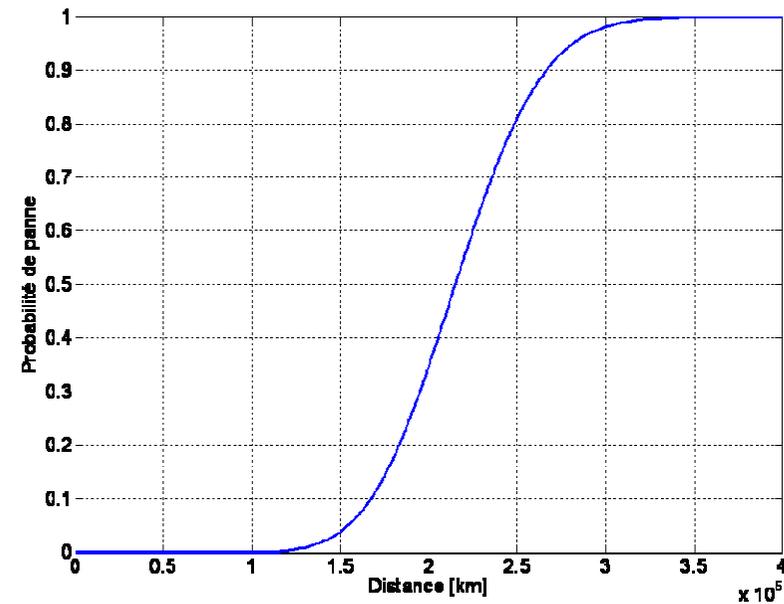
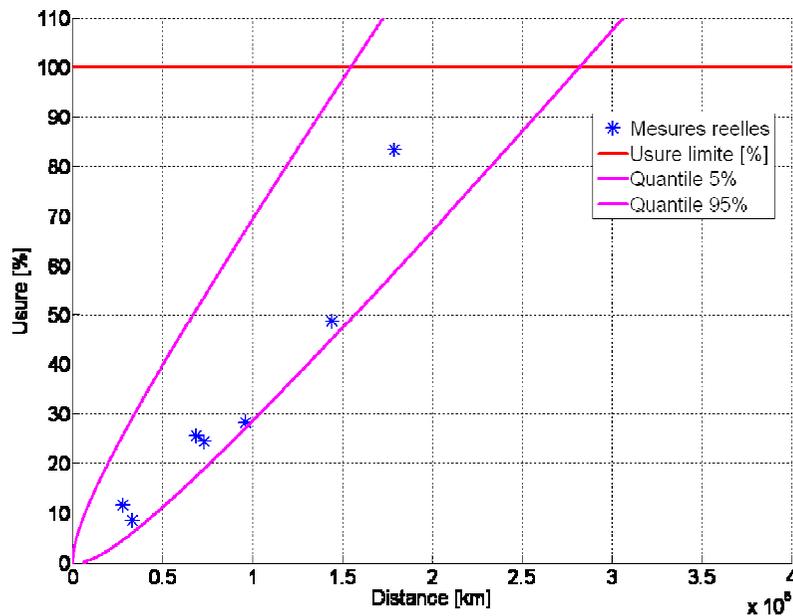
avec  $\Gamma(y) = \int_0^{\infty} z^{y-1} e^{-z} dz$ ,  $\forall y > 0$

- Approprié pour modéliser l'accumulation de dommages graduels et monotones sur une séquence de petits incréments.

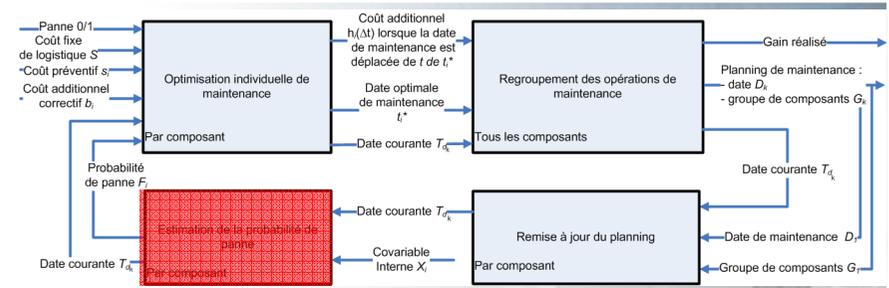


# Cohérence des modèles de dégradation avec processus gamma

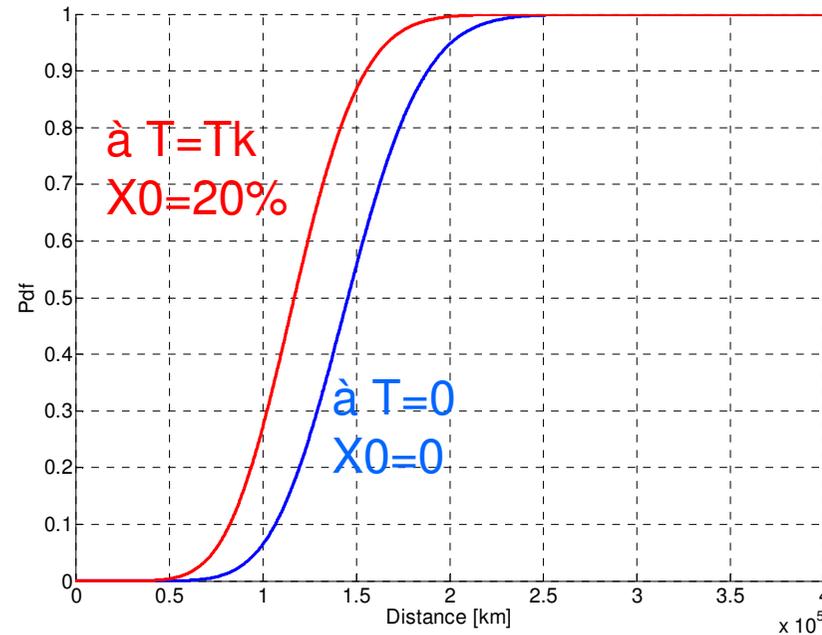
- Exemple: Plaquette de frein avant



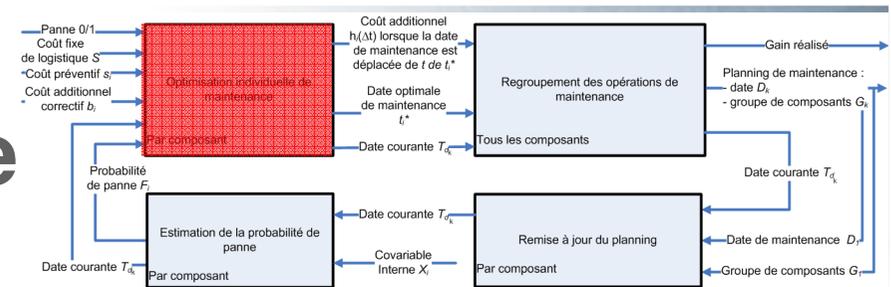
# Estimation de la probabilité de panne



- A chaque date d'inspection  $T_{dk}$ 
  - Récupération des mesures de dégradation  $X_0$
  - Utilisation du modèle de dégradation
- estimation de la probabilité de panne du composant

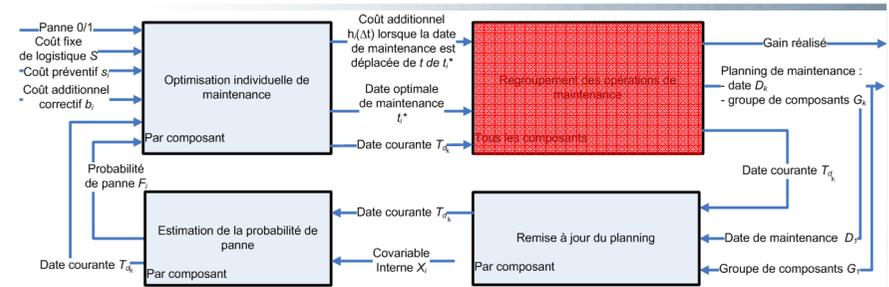


# Optimisation individuelle de maintenance



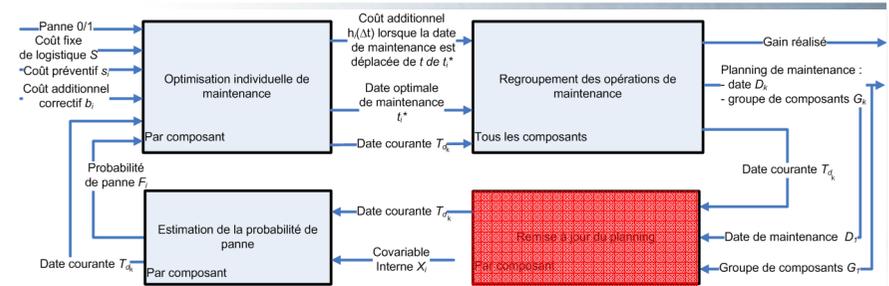
- A chaque date d'inspection  $T_{dk}$  :
  - Calcul du coût moyen de maintenance
  - Détermination de la date optimale et individuelle de maintenance  $t_i^*$
  - Construction de la fonction de pénalité  $h_i$
- dépend de la loi de probabilité de panne  $F_i$  remise à jour à chaque date d'inspection  $T_{dk}$
- loi de probabilité de panne  $F_i$  dynamique

# Regroupement des opérations

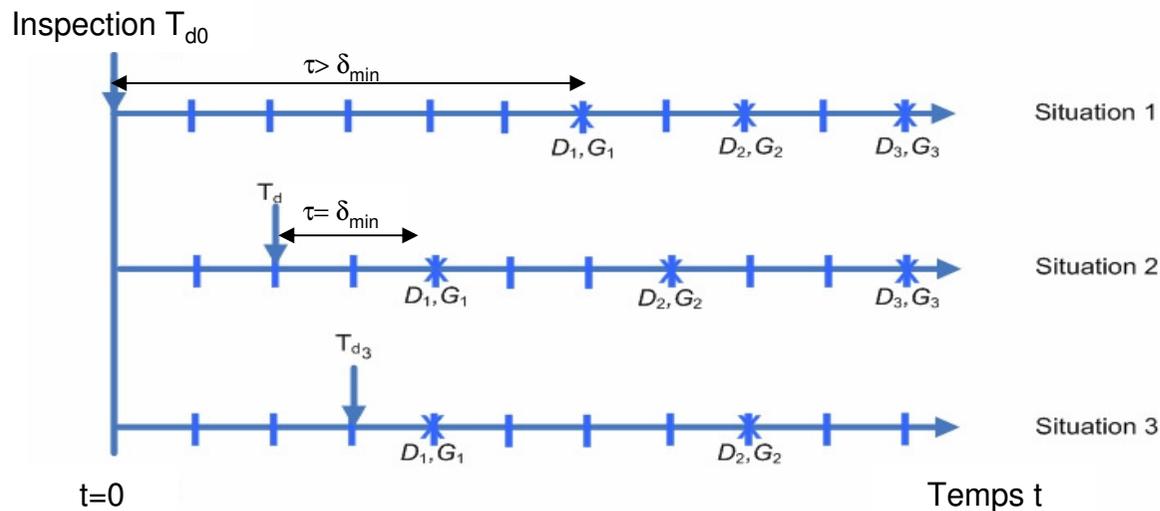


- A chaque date d'inspection  $T_{dk}$  :
  - Définition de l'horizon de planification  $PH = [t, \max_i(t_i^*)]$
  - Algorithme dynamique:
    - Identification de la structure groupante des opérations qui maximise le gain sur cet horizon
    - Interdiction de regrouper plusieurs occurrences d'une même opération de maintenance
    - Intégration d'un temps de préparation de maintenance entre deux dates de maintenance  $\delta_{\min}$

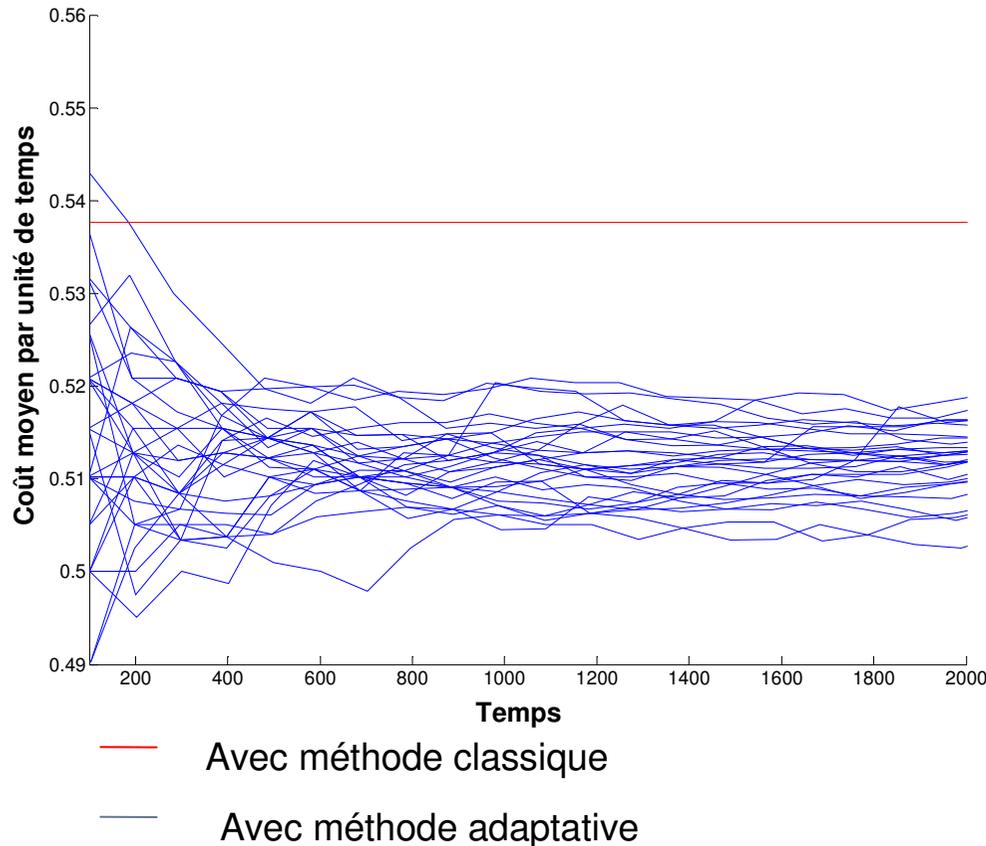
# Phase de décision et remise à jour



- Temps  $\tau$  entre la date courante et la première date planifiée D1
  - Si  $\tau > \delta_{\min}$ : remise à jour du planning à la prochaine date d'inspection
  - Sinon
    - Gel de la date D1 et du groupe G1 d'opérations associé
    - Remise à jour du planning pour les autres opérations



# Exemple numérique 1



- Système: 2 composants identiques

	C1	C2
$\alpha$	10	10
$\beta$	10	10
$L_c$	100	100
$r_i$	10	10
$b_i$	10	10

- Coût fixe logistique  $S = 30$
  - Période d'inspection = 1
  - Coût moyen par unité de temps (calculé par simulation)
    - avec méthode classique = 0,548
    - avec méthode adaptative = 0,513
- Gain = 0,035 (6,4%)

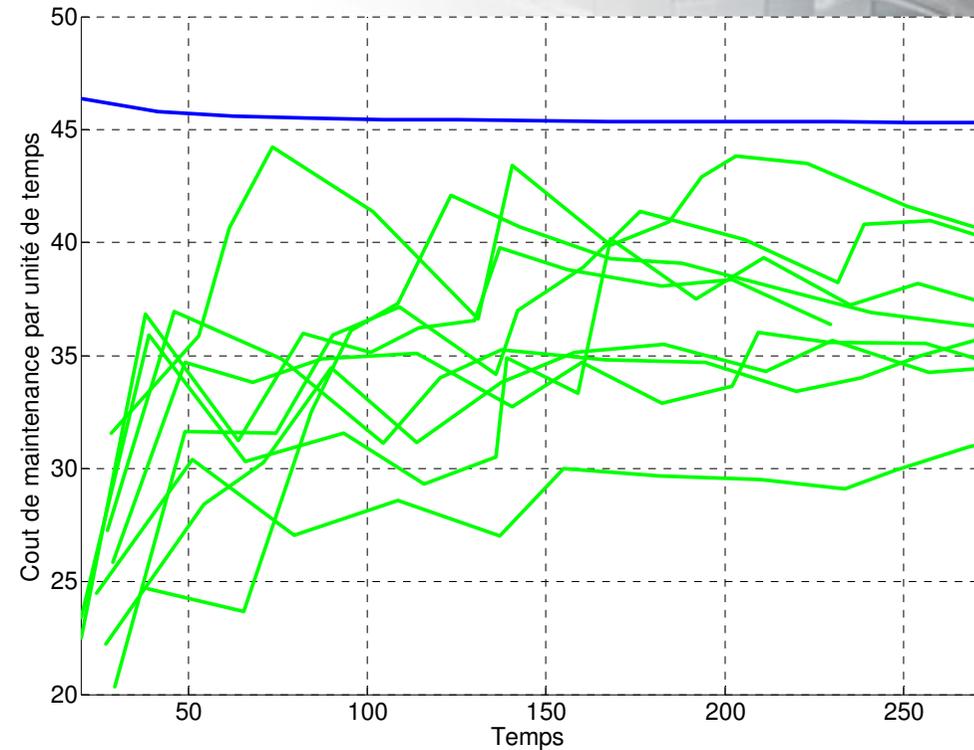
→ Coût avec méthode adaptative < Coût avec méthode classique

# Exemple numérique 2

- Système: 4 composants

	C1	C2	C3	C4
$\alpha$	0.4	0.9	1.6	0.4
$\beta$	0.2	0.3	0.4	0.2
$L_c$	100	100	100	100
$r_i$	150	150	150	200
$b_i$	150	150	150	200

- Coût fixe de logistique  $S = 50$
- Période d'inspection = 10
- Coût moyen par unité de temps (calculé par simulation)
  - avec méthode classique = 45,32
  - avec méthode adaptative = 36,15
  - Gain = 9,17 (20,2%)
- Coût avec méthode adaptative < Coût avec méthode classique



— Avec méthode classique  
 — Avec méthode adaptative

# Conclusion

- Besoin de développer un planning de maintenance adapté pour chaque véhicule industriel en question
- Planification adaptative avec une optimisation de coût
  - Horizon roulant
  - Modèle de dégradation
- Résultats de simulation convaincants
- Travaux futurs
  - Développement d'une méthode adaptative qui gère des types différents d'opérations de maintenance: remplacement basé sur l'âge, maintenance conditionnelle...
  - Simulation d'un cas d'étude avec des données types de véhicule industriel

**Merci pour votre attention**

Questions?