Impact du Programme de Base de Maintenance Préventive sur la Fiabilité :

Quelques Applications EDF Récentes

Yannick Lefebvre, Marie-Agnès Garnero

EDF R&D, département Management des Risques Industriels,
groupe Fiabilité des Composants et Structures

EDF R&D

Plan de la présentation

- Objectif de l'étude : évaluer l'impact d'une modification de la politique de maintenance sur la fiabilité d'un composant

- Quelques caractéristiques des données disponibles : dégradations « qualitatives » et défaillances

- Quel modèle probabiliste pour quantifier l'effet du changement de maintenance ?

- Estimation des paramètres du modèle à partir du Retour d'EXpérience (REX)

- Exploitation du modèle : résultats, limites et préconisations

Plan de la présentation

- Objectif de l'étude : évaluer l'impact d'une modification de la politique de maintenance sur la fiabilité d'un composant

- Quelques caractéristiques des données disponibles : dégradations « qualitatives » et défaillances

- Quel modèle probabiliste pour quantifier l'effet du changement de maintenance ?

- Estimation des paramètres du modèle à partir du Retour d'EXpérience (REX)

- Exploitation du modèle : résultats, limites et préconisations

Contexte & Objectif (1/2)

- On s'intéresse à des composants aujourd'hui soumis à un Programme de Base de Maintenance Préventive (PBMP) du type :
    - Visite complète toutes les *c* années / heures de fonctionnement
      → maintenance *parfaite* effectuée si une dégradation « *significative* » est détectée par l'opérateur
      (à mi-chemin entre préventif systématique et conditionnel)

- Maintenance corrective *minimale* entre deux visites

- Constat
    - Assez peu de dégradations constatées lors des visites
    - Les visites nécessitent des actes intrusifs qui peuvent générer des dégradations

Contexte & Objectif (2/2)

- Par conséquent, on cherche à mettre en place un nouveau PBMP
    - Visite complète toutes les c' années / heures de fonctionnement, avec $c' > c$
    - Maintenance conditionnelle : surveillance pour détecter les symptômes des dégradations
      $\longrightarrow$ maintenance *parfaite* effectuée après détection (+ délai)

- Et toujours une maintenance corrective minimale entre deux visites

- Objectif : quantifier l'impact de cette modification sur la fiabilité
    - Effet négatif de l'espacement des visites (les dégradations restent « cachées » plus longtemps)
    - Effet positif de la surveillance
    - Le gain lié à la limitation des actes intrusifs n'est pas quantifié

Plan de la présentation

- Objectif de l'étude : évaluer l'impact d'une modification de la politique de maintenance sur la fiabilité d'un composant

- Quelques caractéristiques des données disponibles : dégradations « qualitatives » et défaillances

- Quel modèle probabiliste pour quantifier l'effet du changement de maintenance ?

- Estimation des paramètres du modèle à partir du Retour d'EXpérience (REX)

- Exploitation du modèle : résultats, limites et préconisations

Les données disponibles

- Bilan des visites complètes effectuées ces dernières années :
  - Constat binaire : présence / absence de dégradation *significative*
  - Cette information a un caractère *subjectif* et *qualitatif* (il n'existe pas toujours d'indicateur mesurable et de critère bien défini pour dire si une dégradation est importante ou non)

- Bilan des défaillances sur une longue période de fonctionnement

- Comme toujours, défaillances en nombre limité… ce qui oblige à un certain pragmatisme dans le choix du modèle

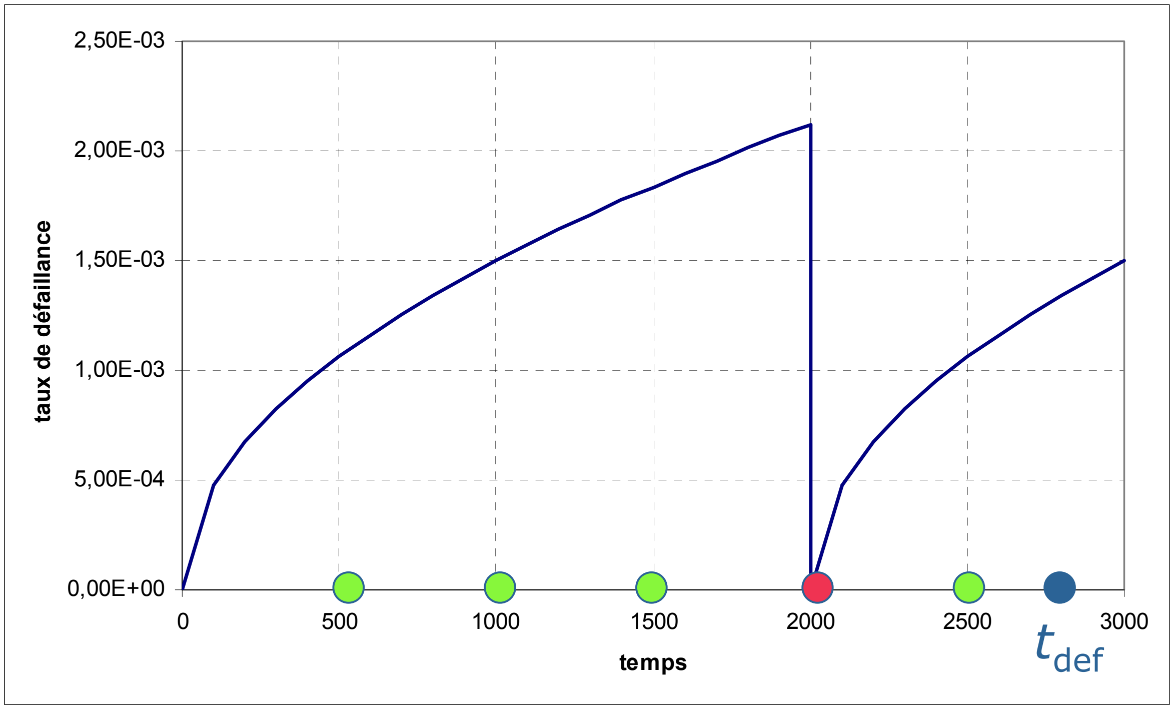
Plan de la présentation

- Objectif de l'étude : évaluer l'impact d'une modification de la politique de maintenance sur la fiabilité d'un composant
- Quelques caractéristiques des données disponibles : dégradations « qualitatives » et défaillances
- Quel modèle probabiliste pour quantifier l'effet du changement de maintenance ?
- Estimation des paramètres du modèle à partir du Retour d'EXpérience (REX)
- Exploitation du modèle : résultats, limites et préconisations

Quel modèle pour réaliser l'étude ? (1/3)

- Une première approche
  - T variable aléatoire = temps de fonctionnement avant défaillance
  - Choix d'un modèle paramétrique $f(.|\underline{\theta})$ pour la loi de T (avec éventuellement la prise en compte de covariables pour la future surveillance)
  - Estimation des paramètres $\underline{\theta}$ à partir du REX ; voir exemple dans le transparent suivant

Quel modèle pour réaliser l'étude ? (2/3)



$\Rightarrow$ Deux données

- $T_1 > 2000$
- $T_2 = t_{def} - 2000$

Problème : ne prend pas en compte toute l'expertise des visites

Défaillance

Visite complète → OK

Visite complète → dégradation

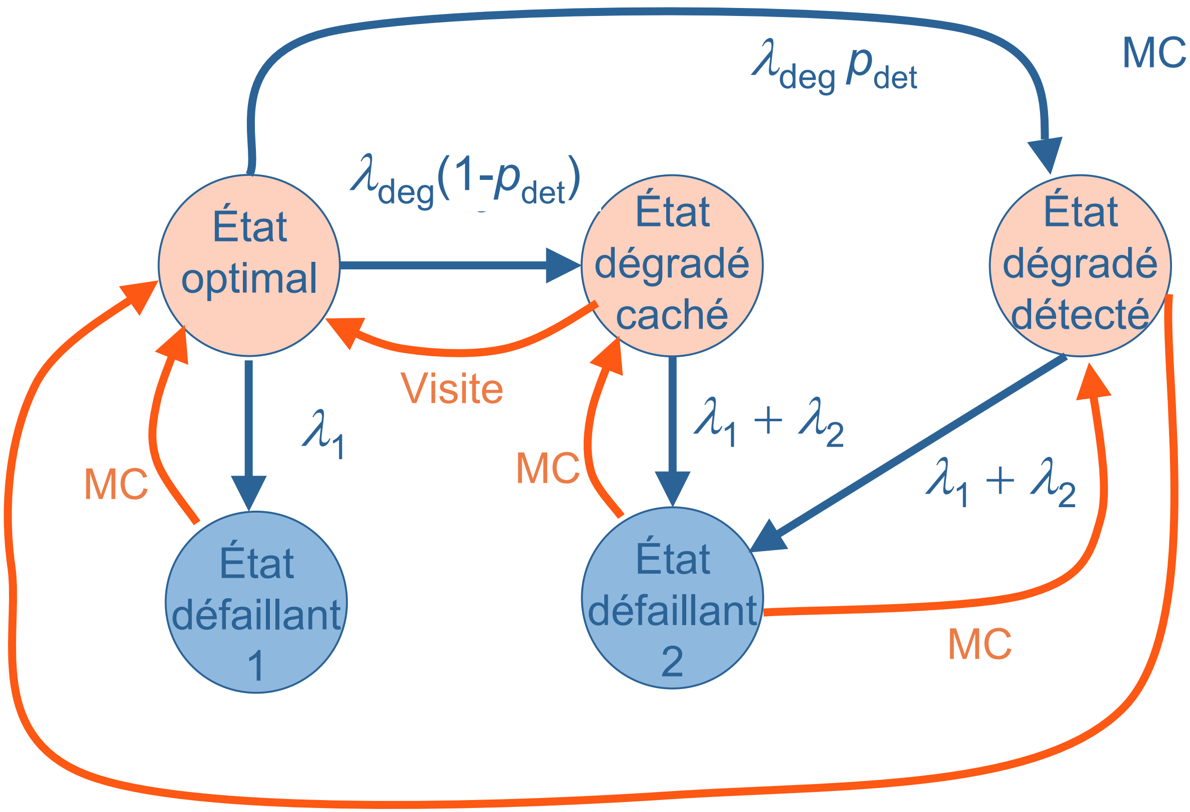
Quel modèle pour réaliser l'étude ? (3/3)

- Une seconde approche
    - Méthode des « quasi-défaillances »
(E. Idée, université de Savoie)
    - Détection d'une dégradation lors d'une visite
$\rightarrow$ traduit en a priori sur le temps qui se serait écoulé avant défaillance

- **Problème** : expertise suffisamment précise ?

EDF R&D

Principe du modèle proposé

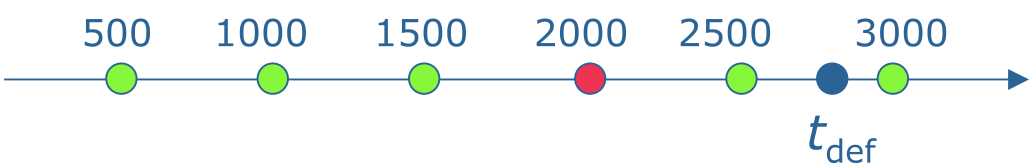


⇒ Trois paramètres à estimer à partir du REX : λ_{deg}, λ_1, λ_2

⇒ Trois paramètres à faire varier dans la prévision : *x* (périodicité visite), p_{det} (proportion de dégradations détectées), t_{int} (délai d'intervention après détection)

Remarque sur le temps avant dégradation

- T_{deg} variable aléatoire = temps de fonctionnement avant dégradation
- Dans notre modèle, on suppose T_{deg} de loi exponentielle
  - Pratique… Mais est-ce pertinent ?
  - Dans les exemples traités, semble OK cf. tests asymptotiques et bootstrap
    (traitement des données : voir exemple ci-dessous)



Visite complète → OK

Visite complète → dégradation

Défaillance

$\Rightarrow$ Deux données

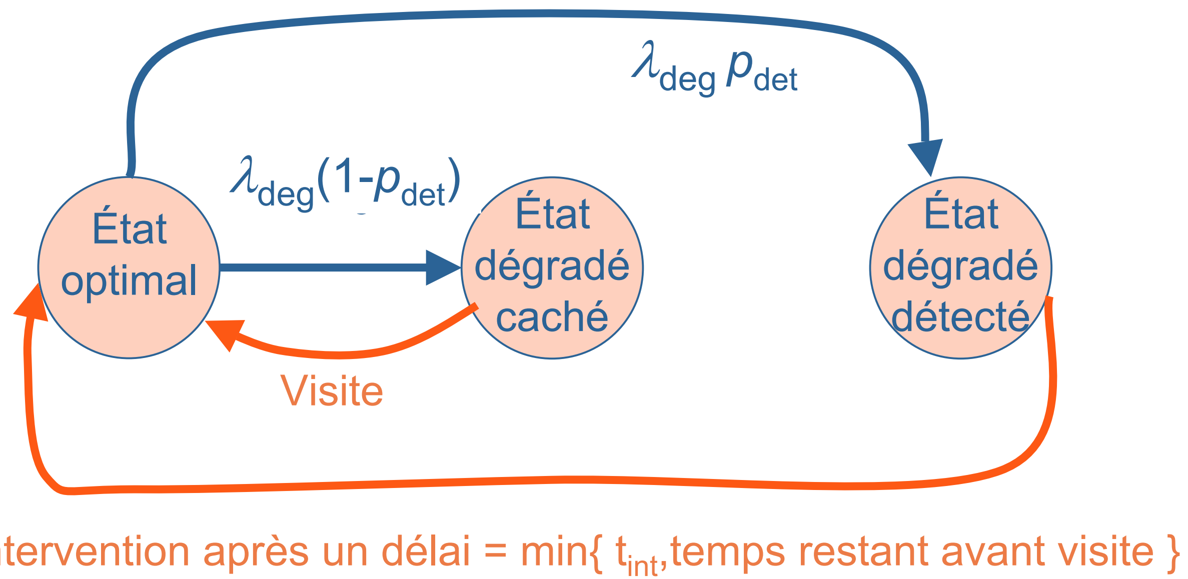
- $1500 < T_{deg,1} < 2000$
- $T_{deg,2} > 1000$

Quel indicateur veut-on obtenir (1/2) ?

- Définition de l'intensité de défaillance

$$\Lambda(t) = \lambda_1 \quad \text{si } Y_t = \text{état optimal}$$
$$\Lambda(t) = \lambda_1 + \lambda_2 \quad \text{si } Y_t = \text{état dégradé (détecté ou non)}$$

- où (Y_t) désigne le processus évoluant comme suit :



Quel indicateur veut-on obtenir (2/2) ?

- Indicateur choisi
  - Espérance moyennée de l'intensité sur un horizon infini

$$\mathbb{E}\left[\Lambda(t)\right] = \lambda_1 + \lambda_2 \left(1 - \mathbb{P}\left[Y_t = \text{état optimal}\right]\right)$$

$$\lambda_\infty = \lim_{t \to +\infty} \frac{1}{t} \int_0^t \mathbb{E}\left[\Lambda(u)\right] \, du$$

  - S'interprète comme un « taux de défaillance équivalent » : on verra dans la partie statistique de l'exposé qu'avec la périodicité de visite *c*, on retrouve l'estimation classique nombre total de défaillances / temps total de fonctionnement

Quelques calculs pour comprendre

- Plaçons nous à un instant $t < x$ (i.e. avant la première visite), et supposons $p_{\text{det}} = 0$

Y_{t} = état optimal ⇔ aucune dégradation sur $[0,t]$

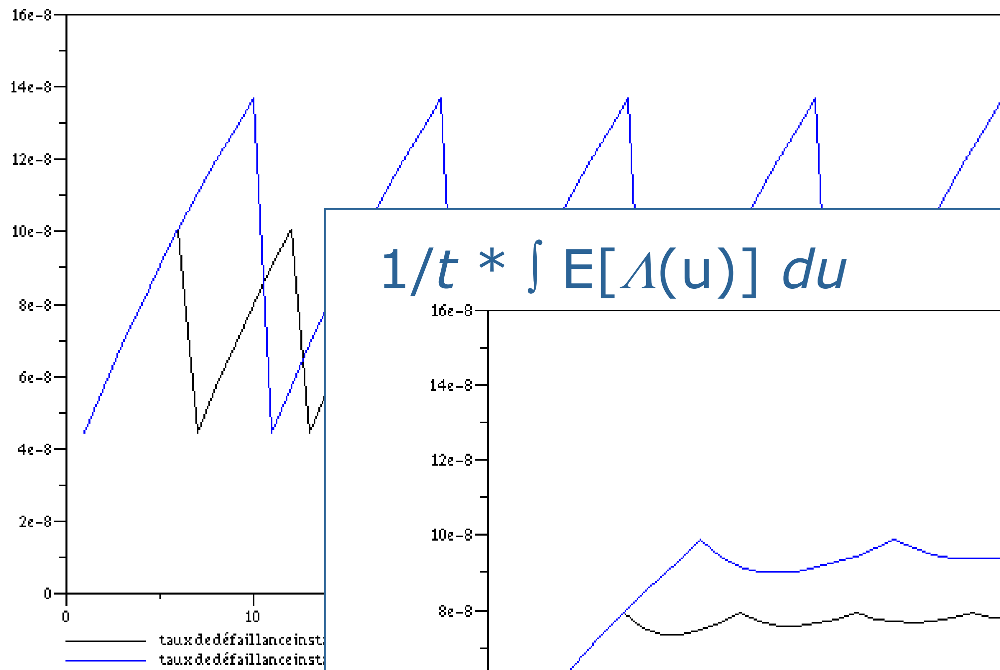
$$\mathbb{P}\left[Y_t = \text{état optimal}\right] = \exp\left(-\lambda_{\text{deg}} t\right).$$

- A un instant t quelconque,

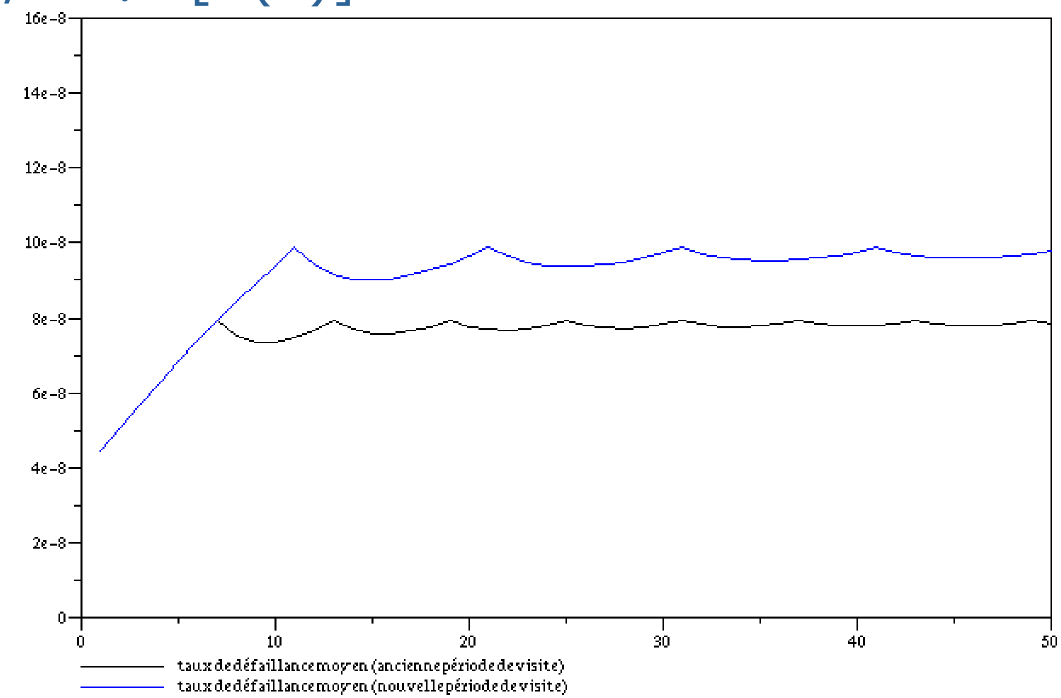
$$\mathbb{P}\left[Y_t = \text{état optimal}\right] = \exp\left(-\lambda_{\text{deg}}\left(t - [t/c] \times c\right)\right)$$

Quelques graphiques pour comprendre

E[$\Lambda(t)$] en fonction de t



$1/t * \int$ E[Λ(u)] du



Quelques calculs pour comprendre (bis)

- Plaçons nous à un instant $t < x$ (i.e. avant la première visite), et supposons $p_{\text{det}} > 0$

  Y_t = état optimal

  - si aucune dégradation n'est apparue
  - si une dégradation a été détectée, que le délai d'intervention s'est écoulé, et qu'aucune autre dégradation n'est ensuite apparue
  - …

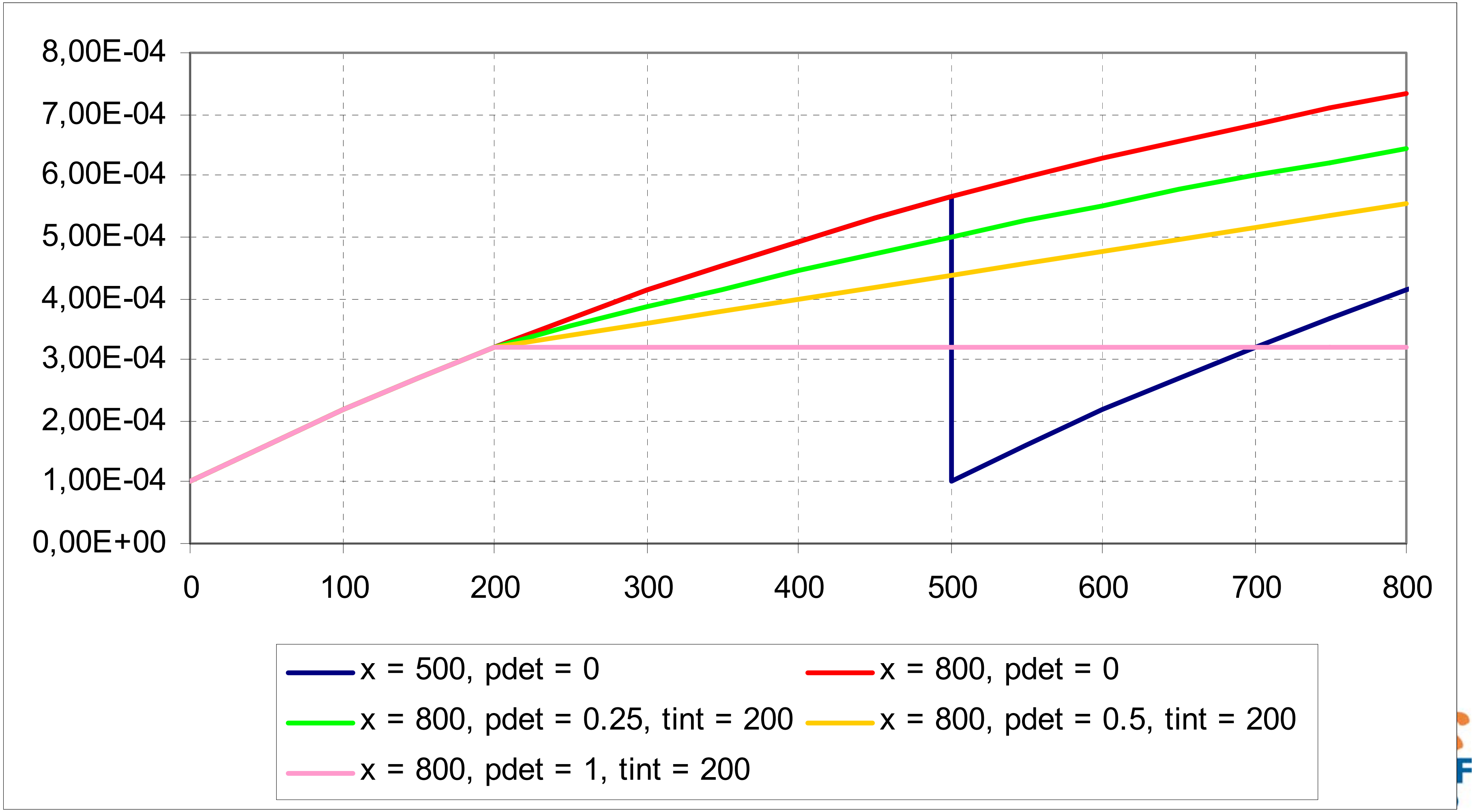
$$\mathbb{P}\left[Y_t = \text{état optimal}\right] = \exp\left(-\lambda_{\text{deg}} t\right) + p_{\text{det}} \int_0^t \mathbf{1}_{\{0 \leq u + t_{\text{int}} \leq t\}} \exp\left(-\lambda_{\text{deg}}(t - u - t_{\text{int}})\right) \lambda_{\text{deg}} \exp\left(-\lambda_{\text{deg}} u\right) du + \ldots$$

$$\mathbb{P}\left[Y_t = \text{état optimal}\right] = \exp\left(-\lambda_{\text{deg}} t\right) + p_{\text{det}} \lambda_{\text{deg}} \left(t - t_{\text{int}}\right)_+ \exp\left(-\lambda_{\text{deg}} \left(t - t_{\text{int}}\right)\right) + \ldots$$

- Et si $t \geq x$, ça se complique…

Quelques graphiques pour comprendre (bis)

E[$\Lambda(t)$] en fonction de t



Calcul exact du taux asymptotique (1/3)

- Propriété de régénération à chaque visite préventive ou intervention suite à détection d'une dégradation :
  - Y_t = état optimal
    - Soit parce qu'il l'était déjà avant
    - Soit parce que la dégradation a été constatée et réparée

- Ainsi, si *V* désigne la durée (aléatoire) entre deux passages dans l'état optimal, et si *W* désigne le temps passé dans l'état optimal sur cette période :

$$\lim_{t \to +\infty} \mathbb{P}\left[Y_t = \text{état optimal}\right] = \frac{\mathbb{E}\left[W\right]}{\mathbb{E}\left[V\right]} \quad \text{si } p_{\text{det}} > 0$$

$$\lim_{t \to +\infty} \frac{1}{t} \int_0^t \mathbb{P}\left[Y_u = \text{état optimal}\right] du = \frac{\mathbb{E}\left[W\right]}{\mathbb{E}\left[V\right]}$$

EDF R&D

Calcul exact du taux asymptotique (2/3)

- On étudie les valeurs possibles de V et W en énumérant les différents cas possibles sur un cycle

  - si aucune dégradation n'est apparue avant la visite

    → $V = x$, $W = x$

  - si une dégradation est survenue à l'instant $u < x$ sans être détectée

    → $V = x$, $W = u$

  - si une dégradation est survenue à l'instant $u < x$, a été détectée, et que le délai a permis une intervention avant la visite ($u+t_{int} < x$)

    → $V = u+t_{int}$, $W = u$

  - si une dégradation est survenue à l'instant $u < x$, a été détectée, mais que le délai n'a pas permis une intervention avant la visite ($u+t_{int} > x$)

    → $V = x$, $W = u$

Calcul exact du taux asymptotique (3/3)

- On obtient la formule suivante (x = périodicité visite) :

$$\lambda_\infty(x) = \lambda_1 + \lambda_2 \left(1 - \frac{1 - \exp\left(-\lambda_{\text{deg}} x\right)}{\lambda_{\text{deg}}\left[\left(1 - p_{\text{det}}\right) x + p_{\text{det}} t_{\text{int}}\right] + \left[1 - \exp\left(-\lambda_{\text{deg}} x\right)\right] p_{\text{det}}}\right)$$

EDF R&D

Plan de la présentation

- Objectif de l'étude : évaluer l'impact d'une modification de la politique de maintenance sur la fiabilité d'un composant

- Quelques caractéristiques des données disponibles : dégradations « qualitatives » et défaillances

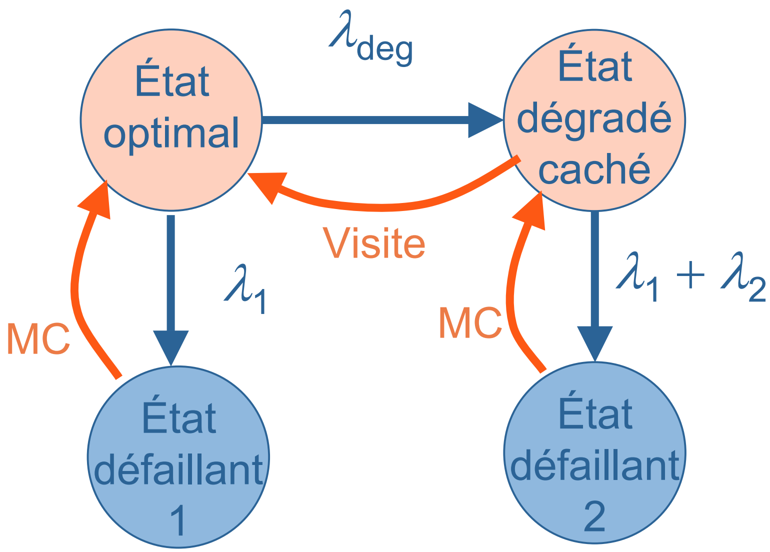
- Quel modèle probabiliste pour quantifier l'effet du changement de maintenance ?

- Estimation des paramètres du modèle à partir du Retour d'EXpérience (REX)

- Exploitation du modèle : résultats, limites et préconisations

Rappel : les paramètres à estimer

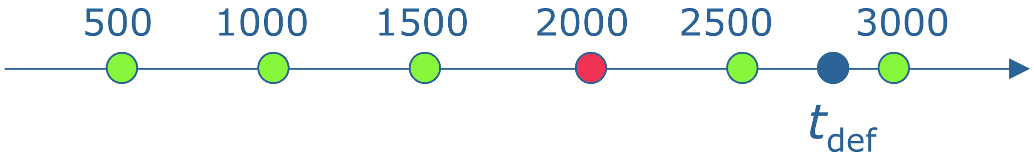
MC = Maintenance Corrective



$\Rightarrow$ Trois paramètres à estimer à partir du REX : λ_{deg}, λ_1, λ_2

Rappel sur les données

- Contexte de données « cachées »
  - L’état du processus de dégradation n’est connu qu’au moment des visites
  - On aurait pu envisager un algorithme de type EM… en fait, on a fait moins bien… mais plus simple ;o)



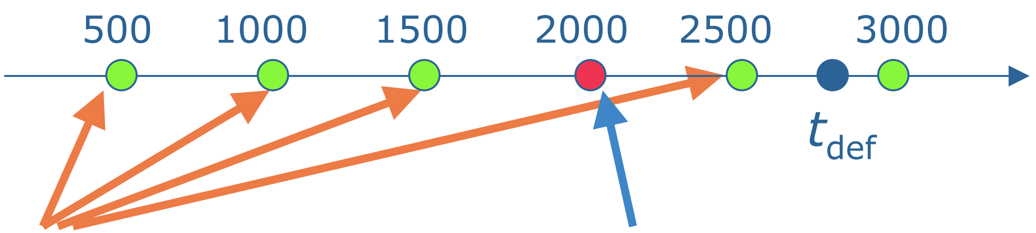
- Visite complète → OK
- Visite complète → dégradation
- Défaillance

Approche séquentielle

- estimation de λ_{deg} en « oubliant » les défaillances
- estimation de λ_1 et λ_2 par rapport à un comportement « moyen » du processus de dégradation

Estimation du taux de dégradation

- Visite complète → OK
- Visite complète → dégradation
- Défaillance



Pas de dégradation
Vraisemblance = $\exp(-\lambda_{deg} c)$

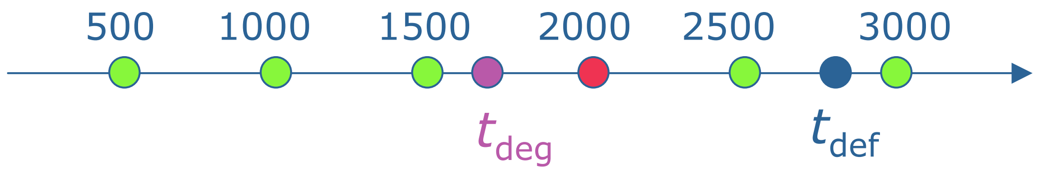
Dégradation
Vraisemblance = $[1 - \exp(-\lambda_{deg} c)]$

$$1 - \exp\left(-\widehat{\lambda}_{\text{deg}} c\right) = \frac{n_{\text{dégradations}}}{n_{\text{visites}}}$$

$$\widehat{\lambda}_{\text{deg}} \simeq \frac{n_{\text{dégradations}}}{n_{\text{visites}} c}$$

Estimation des taux de défaillance (1/3)

- Si l'on connaissait toute la trajectoire du processus de dégradation…



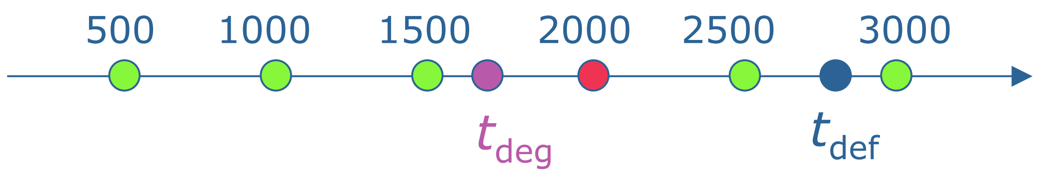
- Visite complète → OK
- Visite complète → dégradation
- Défaillance
- Apparition de la dégradation

$$\widehat{\lambda}_1 = \frac{n_{\text{défaillances indépendantes des dégradations}}}{t_{\text{fonctionnement total}}}$$

$$\widehat{\lambda}_2 = \frac{n_{\text{défaillances liées aux dégradation}}}{t_{\text{fonctionnement dégradé}}}$$

On dispose d'expertise pour les numérateurs… mais quid des temps de fonctionnement ?

Estimation des taux de défaillance (2/3)



- Visite complète → OK
- Visite complète → dégradation
- Défaillance
- Apparition de la dégradation

$$\widehat{\lambda}_2 = \frac{n_{\text{défaillances liées aux dégradation}}}{t_{\text{fonctionnement dégradé}}}$$

ou

$$\widehat{\lambda}_2 = \frac{n_{\text{défaillances liées aux dégradation}} + n_{\text{dégradations}}}{t_{\text{fonctionnement dégradé}} + n_{\text{dégradations}} \times c}$$

Dans l'esprit des « quasi-défaillances » : on suppose que les dégradations auraient dégénéré en défaillances avant la visite suivante

Estimation des taux de défaillance (3/3)

$$\widehat{\lambda}_1 = \frac{n_{\text{défaillances indépendantes des dégradations}}}{t_{\text{fonctionnement total}}}$$

$$\widehat{\lambda}_2 = \frac{n_{\text{défaillances liées aux dégradation}}}{t_{\text{fonctionnement dégradé}}}$$

- On remplace les temps inconnus par leur espérance (faisant appel à l'estimation du taux de dégradation)

$$\begin{aligned} t_{\text{fonctionnement optimal}} & \leftrightarrow t_{\text{total}} \lim_{u \to +\infty} \frac{1}{u} \int_0^u \mathbb{P}\left[Y_s = \text{état optimal} \middle| \widehat{\lambda}_{\text{deg}}\right] ds \\ & = \frac{1 - \exp\left(-\widehat{\lambda}_{\text{deg}} c\right)}{\widehat{\lambda}_{\text{deg}} c} t_{\text{total}} \end{aligned}$$

Quand λ_{deg} tend vers 0, cela revient à considérer que les dégradations se sont produites au milieu de la période entre 2 visites → approche très arbitraire !

Synthèse des données nécessaires

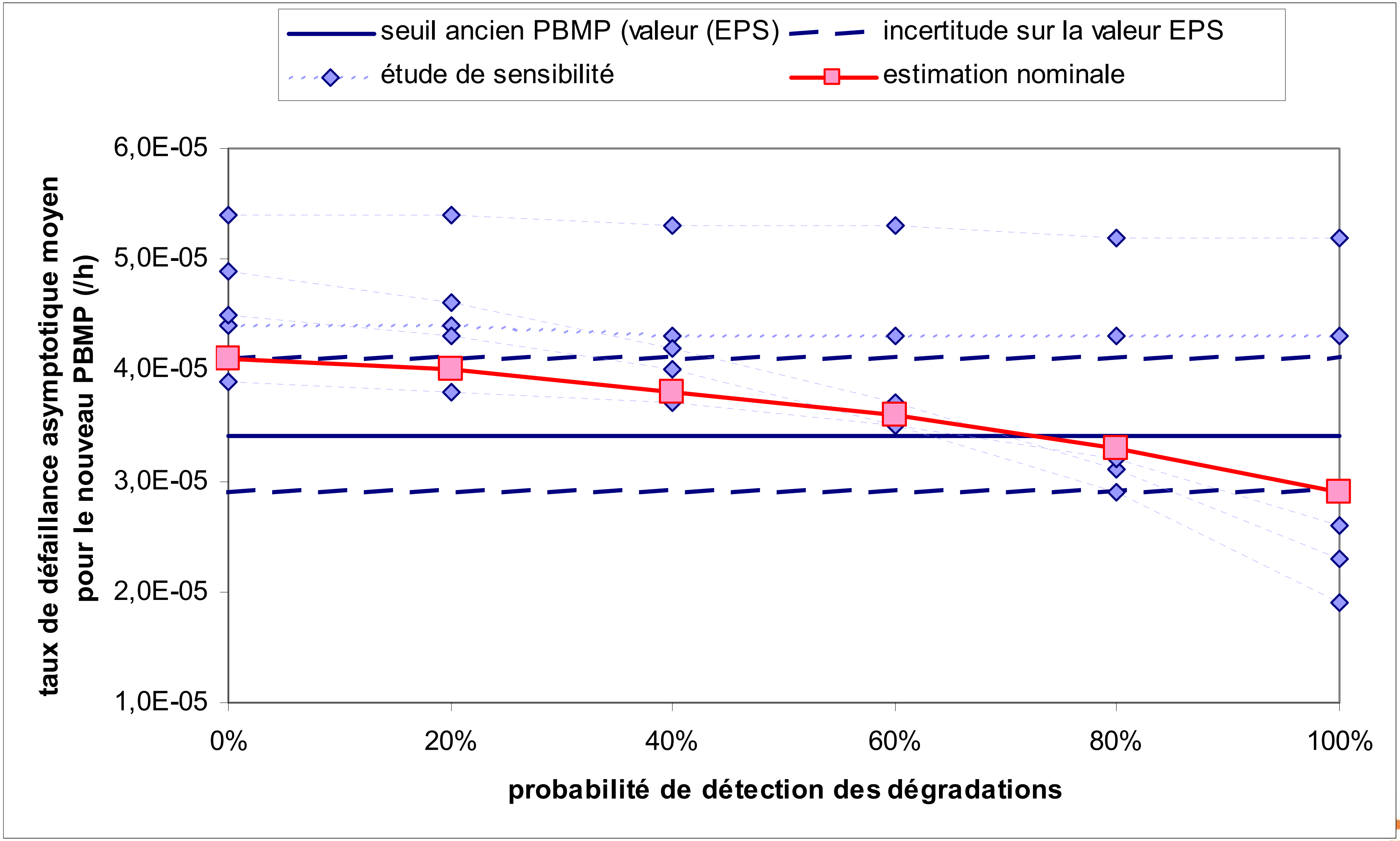
- Avec l'approche séquentielle utilisée et les caractéristiques du modèle (lois exponentielles partout !)
  - Dégradations
    - Nombre de visites sur la période étudiée
    - Nombre de visites ayant conclu à la présence d'une dégradation *significative*
  - Défaillances (potentiellement sur une période différente)
    - Nombre de défaillances
    - *Nombre de défaillances liées aux dégradations*

- Pour aller vers une approche statistique non séquentielle
  - Analyse des dégradation et des défaillances sur une même période
- Pour avoir des éléments de validation des hypothèses du modèle
  - Historique détaillé des défaillances et des dégradations

Plan de la présentation

- Objectif de l'étude : évaluer l'impact d'une modification de la politique de maintenance sur la fiabilité d'un composant
- Quelques caractéristiques des données disponibles : dégradations « qualitatives » et défaillances
- Quel modèle probabiliste pour quantifier l'effet du changement de maintenance ?
- Estimation des paramètres du modèle à partir du Retour d'EXpérience (REX)
- Exploitation du modèle : résultats, limites et préconisations

Type de résultats présentés



Messages importants

- Une approche simple (tant au niveau des calculs qu’au niveau de la collecte des données) pour obtenir un premier ordre de grandeur

- Pour compléter l’analyse, il faut a minima
    - Effectuer des études de sensibilité sur les points délicats dans l’interprétation du REX et les param. De prévision
    - Si le modèle donne un « feu vert », prévoir la mise en place de visites à des périodicités intermédiaires pour valider progressivement les prévisions

- Attention à ne pas se focaliser sur la simplicité de l’approche
    - Dans l’absolu, il faut une collecte plus poussée des données pour valider a priori les hypothèses du modèle
    - La simplicité des calculs cache des hypothèses fortes (e.g. lois exp. → taux asymptotique borné)