

# Activités en Fiabilité et MAintenance au sein de l'équipe FIGAL du Laboratoire Jean Kuntzmann

Laurent Doyen

Laboratoire Jean Kuntzmann (LJK)  
Département probabilités et statistique  
Equipe FIGAL

LJK - Grenoble - 25 septembre 2014

## LJK, Laboratoire de Mathématiques Appliquées et Informatique

3 départements :

- Géométrie et Image,
- Modèles et Algorithmes Déterministes,
- Probabilités et Statistique.

LJK, Laboratoire de Mathématiques Appliquées et Informatique

3 départements :

- Géométrie et Image,
- Modèles et Algorithmes Déterministes,
- Probabilités et Statistique.

# LJK - FIGAL

Equipe FIGAL (Fiabilité et Géométrie Aléatoire) :

- Outil commun : processus ponctuels aléatoires.
- Objectifs communs :
  - construire et étudier des modèles aléatoires,
  - effectuer l'inférence statistique de ces modèles,
  - mesurer l'adéquation de ces modèles,
  - mener le développement logiciel associé.
- Deux thématiques :
  - fiabilité, (1 PR, 3 MCF, 1 post-doc, 1 fin thèse)
  - géométrie aléatoire.

# LJK - FIGAL

Equipe FIGAL (Fiabilité et Géométrie Aléatoire) :

- Outil commun : processus ponctuels aléatoires.
- Objectifs communs :
  - construire et étudier des modèles aléatoires,
  - effectuer l'inférence statistique de ces modèles,
  - mesurer l'adéquation de ces modèles,
  - mener le développement logiciel associé.
- Deux thématiques :
  - **fiabilité**, (1 PR, 3 MCF, 1 post-doc, 1 fin thèse)
  - géométrie aléatoire.

# Thématiques

Nos thématiques de recherche actuelles :

- Modélisation et inférence pour l'effet des maintenances imparfaites,
- Tests d'adéquation aux modèles de fiabilité,
- Essais de dégradation accélérées.

# Thématiques

Nos thématiques de recherche actuelles :

- Modélisation et inférence pour l'effet des maintenances imparfaites,
- Tests d'adéquation aux modèles de fiabilité,
- Essais de dégradation accélérées.

## Contexte industriel

Tout au long de leur cycle de vie, les systèmes industriels complexes sont soumis à des actions de maintenance :

- **Maintenance Corrective (MC, réparation) :**
  - suite à une défaillance,
  - but : remettre le système en état de fonctionner.
- **Maintenance Préventive (MP) :**
  - quand le système est en état de fonctionner,
  - but : ralentir le vieillissement.

Une maintenance efficace et un vieillissement contrôlé permettent la prolongation de la durée d'exploitation des matériels.

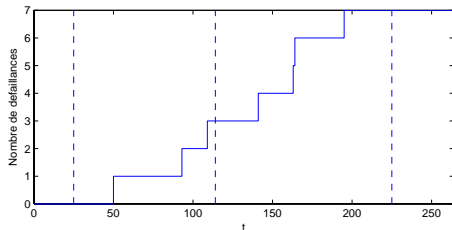
⇒ Enjeu industriel capital.



## Exemple de données - MC et MP planifiées

Composant d'un système de production d'électricité EDF  
7 MC, 4 MP - Dates en nombres de démarrages à froid (CS)

25	50	93	109	114	141
163	164	195	225	264	



## Exemple de modèle : $ARA_{\infty}$ - $ARA_{\infty}$

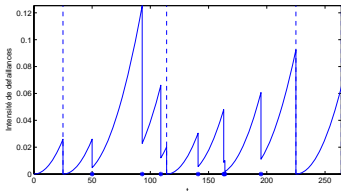
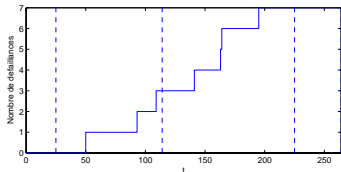
L'effet de chaque maintenance est de réduire l'âge virtuel, d'une quantité proportionnelle à cet âge virtuel, avec des coefficients de proportionnalités différents pour la MP et la MC :

$$A_{k+1} = (1 - \rho_p)^{U_{k+1}} (1 - \rho_c)^{1 - U_{k+1}} [W_{k+1} + A_k]$$

L'intensité de défaillance est :

$$\lambda_t = \lambda \left( t - C_{K_{t-}} + \sum_{j=1}^{K_{t-}} (1 - \rho_p)^{M_t - M_{C_{j-1}}} (1 - \rho_c)^{N_t - N_{C_{j-1}}} W_j \right)$$

## Exemple de données - Estimation des paramètres



$$\text{Modèle ARA}_{\infty}\text{-ARA}_{\infty} : \hat{\alpha} = 1.16 \cdot 10^{-5} \quad \hat{\beta} = 3.05$$
$$\hat{\rho}_c = 0.565 \quad \hat{\rho}_p = 1$$

⇒ vieillissement intrinsèque fort, MP parfaites, MC réduisent de moitié l'âge virtuel du système

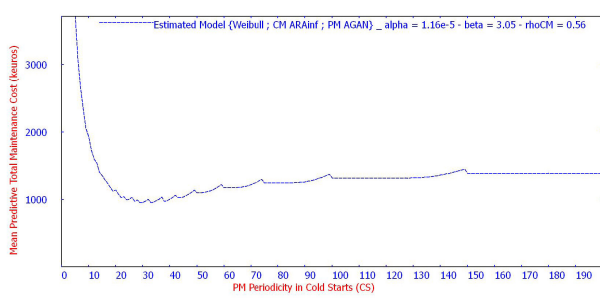
## Optimisation de la maintenance

- Ayant choisi un modèle sur la base du passé, on peut simuler le futur selon plusieurs politiques de MP et choisir la meilleure d'entre elles.
- Minimisation du coût moyen de maintenance sur une période  $[t_{OBS}; t_{OBJ}]$  pour une périodicité de MP  $\omega_{MP}$  :

$$E[C_{TOT}(\omega_{MP})] = E[N_{t_{OBJ}} - N_{t_{OBS}}] C_{MC} + (M_{t_{OBJ}} - M_{t_{OBS}}) C_{MP}$$

$$\text{où } M_{t_{OBJ}} - M_{t_{OBS}} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{t_{OBJ} - t_{REF}}{\omega_{MP}} \right\rfloor & \text{si } \omega_{MP} \geq t_{OBS} - t_{REF} \\ 1 + \left\lfloor \frac{t_{OBJ} - t_{OBS}}{\omega_{MP}} \right\rfloor & \text{si } \omega_{MP} < t_{OBS} - t_{REF} \end{cases}$$

# Exemple de données - Optimisation de la maintenance

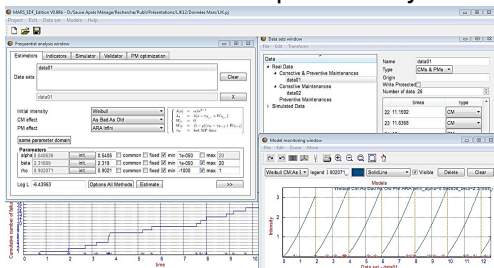


La périodicité optimale est  $\omega_{MP}^{OPT} = 29$  CS avec un coût moyen prédictif de maintenance de 950 Keuros.

La périodicité a été réduite de 71 CS. Le gain en coût est de 24%.

# Collaboration LJK - EDF R&D

- Collaboration contractuelle depuis 12 ans entre le LJK-FIGAL et EDF R&D sur les thèmes du vieillissement et de la maintenance.
- Depuis 2008, développement du logiciel MARS (Maintenance Assessment of Repairable Systems)



## Collaboration LJK - EDF R&D

- Collaboration contractuelle depuis 12 ans entre le LJK-FIGAL et EDF R&D sur les thèmes du vieillissement et de la maintenance.
- Depuis 2008, développement du logiciel MARS (Maintenance Assessment of Repairable Systems)
  - Modèles aléatoires des effets conjoints du vieillissement et des maintenances.
  - Analyse statistique de ces modèles : estimation de ces effets.
  - Calcul d'indicateurs de fiabilité.
  - Simulation intensive et validation de procédures d'estimation.
  - Optimisation de la maintenance, pronostic.

## Collaboration LJK - EDF R&D

- Collaboration contractuelle depuis 12 ans entre le LJK-FIGAL et EDF R&D sur les thèmes du vieillissement et de la maintenance.
- Depuis 2008, développement du logiciel MARS (Maintenance Assessment of Repairable Systems)
- Collaboration avec GDF Suez (depuis 2014) et Hydro Quebec (à venir) sur l'évaluation de l'effet des maintenances.



## Projet ANR AMMSI

AMMSI (Ageing and Maintenance in reliability : Modelling and Statistical Inference) :

- projet ANR (2012 - 2016) ;
- porté par Grenoble INP - LJK : O. Gaudoin ;
- partenaires : Université de Pau et des Pays de l'Adour, Université de Franche-Comté, Université de Technologie de Troyes, EDF R&D, SNCF.
- Objectif : proposer des méthodes et outils mathématiques innovants pour la maîtrise du vieillissement des systèmes industriels.
- Recherche fondamentale et industrielle.

# Thématiques

Nos thématiques de recherche actuelles :

- Modélisation et inférence pour l'effet des maintenances imparfaites,
- Tests d'adéquation aux modèles de fiabilité,
- **Essais de dégradation accélérés.**

## Contexte

Evaluer la durée de vie d'équipements de protection électrique (Schneider Electric).

- Systèmes très fiables → Essais accélérés.
- Systèmes dormants → Les modèles classiques (AFT) ne peuvent pas être utilisés.
- On mesure un niveau de dégradation → Essais de dégradation accélérée.

*Objectifs* : Conduire des essais accélérés, développer et appliquer un package R, développer de nouveaux modèles et des méthodes statistiques.

# Accelerated Destructive Degradation Test (ADDT)

## Modèle ADDT :

- Sous le stress standard  $\underline{x}_{ref}$ , on connaît une transformation croissante  $g(\cdot)$  qui linéarise la dégradation  $D$ .
- Pour tout système  $i$ , l'effet d'un stress  $x_i$  est de changer l'échelle de temps  $t$ , proportionnellement à un facteur d'accélération  $\mathcal{AF}(\underline{x}_i)$ .

$$Y_i \stackrel{\text{def}}{=} g(D_i) = a^{(0)} + a^{(1)} \mathcal{AF}(\underline{x}_i) t_i + \sigma U_i$$

avec  $U_i$  des variables aléatoires iid (de loi  $\mathcal{N}(0, 1)$ ).

La défaillance correspond au fait que la dégradation dépasse un seuil fixé et connu  $d_f$ .

# Données Schneider Electric

- $k = 104$  systèmes indépendants.
- $\underline{x}^T = [TK, RH]$  : Température et Humidité Relative.

## Hypothèse destructive du modèle ADDT :

On ne considère que la première mesure de chaque système.

> SE\_data

	D	t	TK	RH
1	0.32500	0.1363636	313.15	60
2	0.37500	0.1363636	313.15	60
...				
103	0.91750	1.0000000	333.15	95
104	0.71875	1.0000000	333.15	95

# Application aux données Schneider Electric

Modèle de Peck (pas d'interaction entre les stress) :

$$AF(TK, RH) = \exp\left(E_a\left(\frac{1}{\kappa TK_{ref}} - \frac{1}{\kappa TK}\right)\right) \left(\frac{RH}{RH_{ref}}\right)^{b^{(1)}}$$

avec  $\kappa = 1/11605$  la constante de Boltzmann.

Moindres carrés ( $\Leftrightarrow$  maximum de vraisemblance) :

```
> addt( D~t | 11605/TK & -log(RH) ,xref=c(292.15,75),
```

```
+ data=SE_data) ->SE_addt
```

```
> summary(SE_addt)
```

```
$coefficients
```

(intercept)	t	11605/TK	-log(RH)
-0.9333539	0.2255183	0.1429325	2.7506991

```
$sigma
```

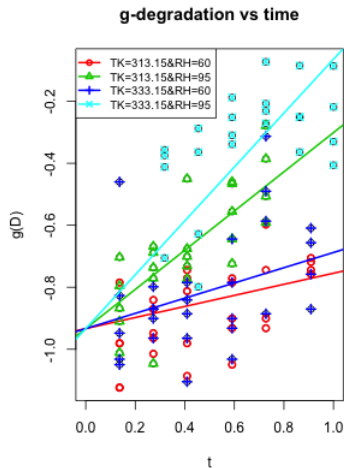
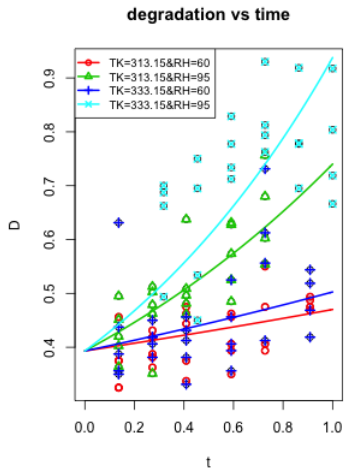
```
[1] 0.1522754
```

```
$r.squared
```

```
[1] 0.6913828
```

# Application aux données Schneider Electric

> plot(SE\_addt,"all dégradations",pos="topleft")



## Application aux données Schneider Electric

- $d_f = 1$ .

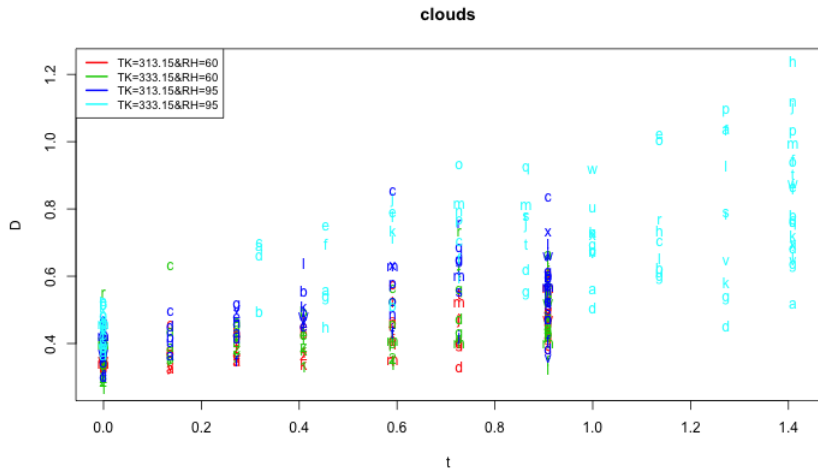
```
> failure.time.quantile(SE_addt,1,TK=288.15:292.15,RH=70,p=0.95)  
[1] 3.968150 3.889932 3.813779 3.739625 3.667405
```

### Interprétation :

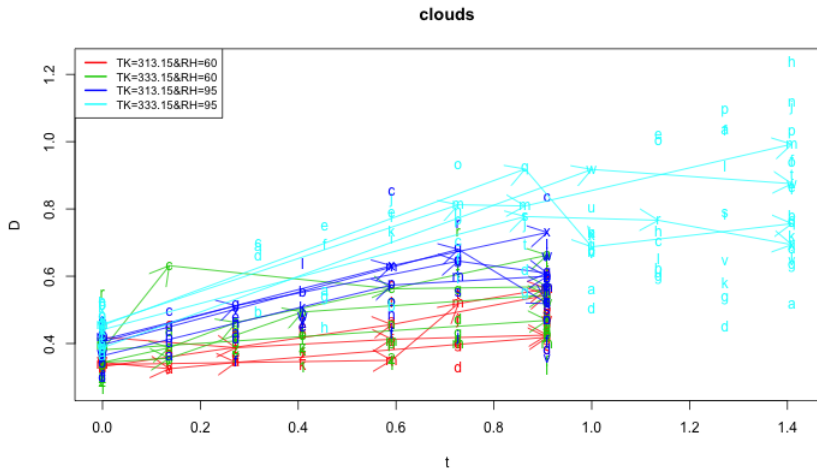
Sous ( $TK = 289.15$ ,  $RH = 70$ ), le système a 95% de chance d'être en état de fonctionner après  $t = 3.89$  unités de temps.



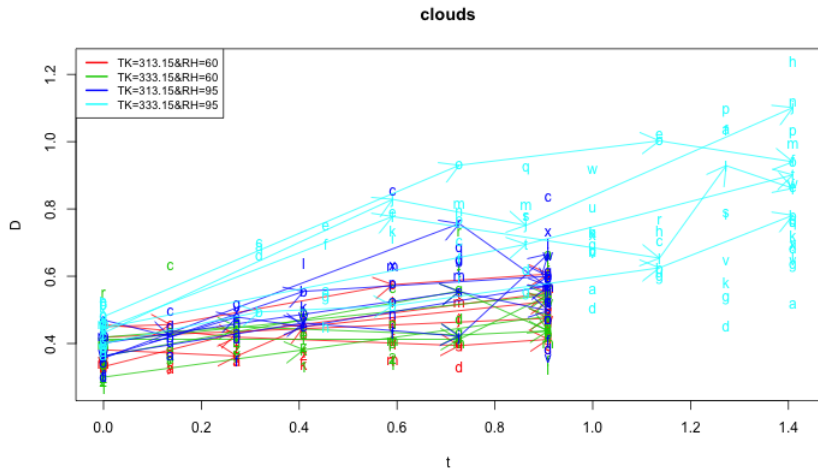
# Mesures multiples



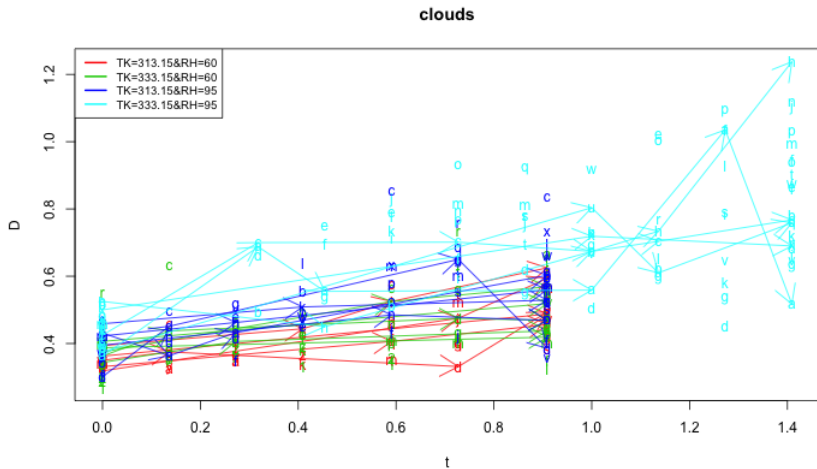
# Mesures multiples



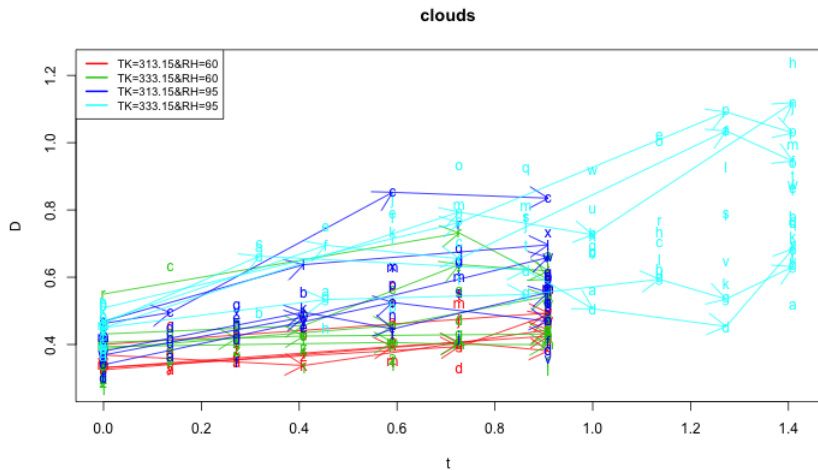
# Mesures multiples



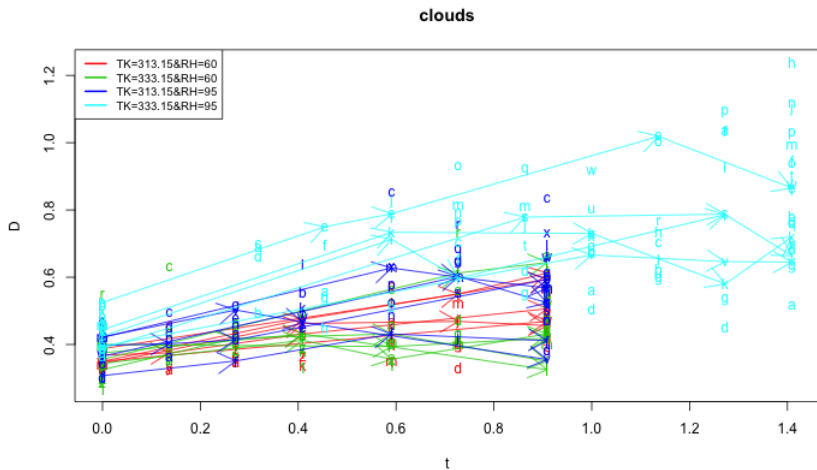
# Mesures multiples



# Mesures multiples

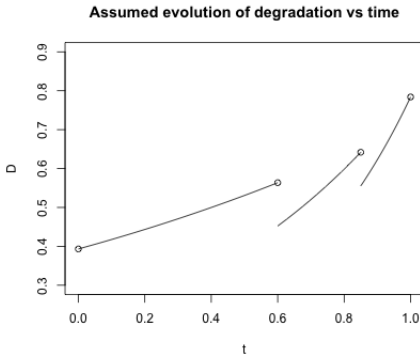


# Mesures multiples



## Futurs enjeux

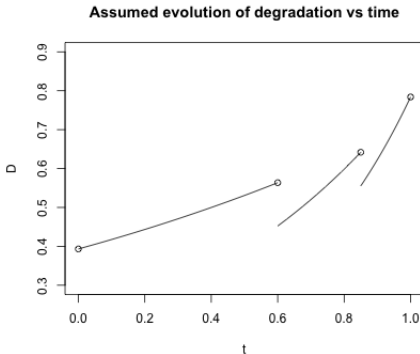
- Activer un système corrodé modifie sa dégradation :



- Le principal facteur d'accélération de la corrosion est le sel : pas de modèle physique d'accélération reconnu (comme Arrhénius pour la température) pour la concentration en sel.

## Futurs enjeux

- Activer un système corrodé modifie sa dégradation :



- Le principal facteur d'accélération de la corrosion est le sel : pas de modèle physique d'accélération reconnu (comme Arrhénius pour la température) pour la concentration en sel.