



**Maintenance prédictive
par apprentissage statistique
et jumeau numérique**

26 novembre 2020

Claire-Eleuthèriane Gerrer - Sylvain Girard

gerrer@phimeca.com - girard@phimeca.com

Comment anticiper la défaillance d'un système de refroidissement à partir de sa modélisation et des données de suivi ?

Le système moteur-pompe

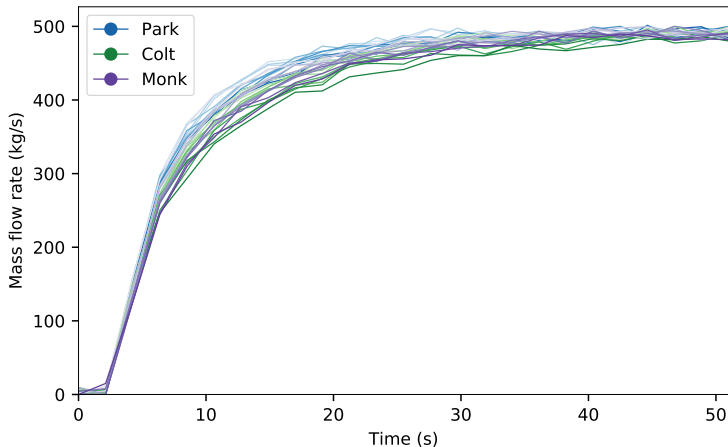
- ▶ Considérons un système de refroidissement composé d'une pompe centrifuge activée par un moteur.



- ▶ La pompe doit atteindre son débit massique nominal en moins de 30 s après allumage.

Surveillance de trois unités

- ▶ On s'intéresse à trois systèmes pompe-moteur nommés **Park**, **Colt** et **Monk** (données fabriquées).
- ▶ On observe trois régimes transitoires par an pour chaque unité, pendant 10 ans.

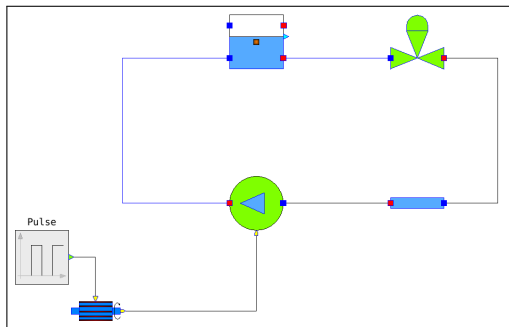


Surveillance de trois unités

- ▶ But : prédire l'instant de défaillance des unités Park, Colt et Monk.
- ▶ Moyen :
 - construire le jumeau numérique de chaque unité,
 - réduire le modèle,
 - estimer les paramètres responsables de sa dégradation,
 - extrapoler l'évolution de ces paramètres.
- ▶ Les trois jumeaux numériques sont basés sur le même modèle physique, avec trois jeux de paramètres *a priori* différents.

Construction du modèle physique

- ▶ On modélise la pompe centrifuge et son moteur.
- ▶ Langage Modelica : on utilise la bibliothèque de thermodynamique [ThermoSysPro](http://www.thermosyspro.com)¹.



1. www.thermosyspro.com

Construction du modèle physique

- ▶ Seuls deux paramètres se dégradent avec le temps :
 - l'amortissement du moteur,
 - un coefficient caractéristique de la pompe.

- ▶ On simule le régime transitoire du système moteur-pompe sur une durée de 50 s.

- ▶ Le modèle numérique a :
 - 1 entrée (fonction échelon),
 - 2 paramètres,
 - 25 sorties (le débit massique est échantillonné toutes les deux secondes).

Réduction du modèle

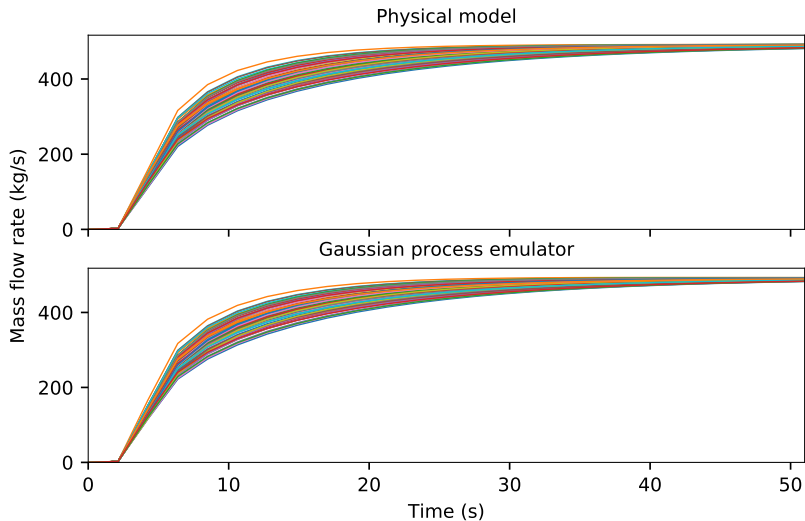
- ▶ Ce modèle physique est coûteux en temps de calcul, or l'estimation de paramètres demande beaucoup de simulations.
- ▶ On crée un émulateur pour reproduire le comportement du modèle physique à moindre coût.
- ▶ Méthode : exporter le modèle Modelica en FMU et l'exploiter via les bibliothèques Python [OpenTURNS](#)² et [OTFMI](#)³.

2. www.openturns.org

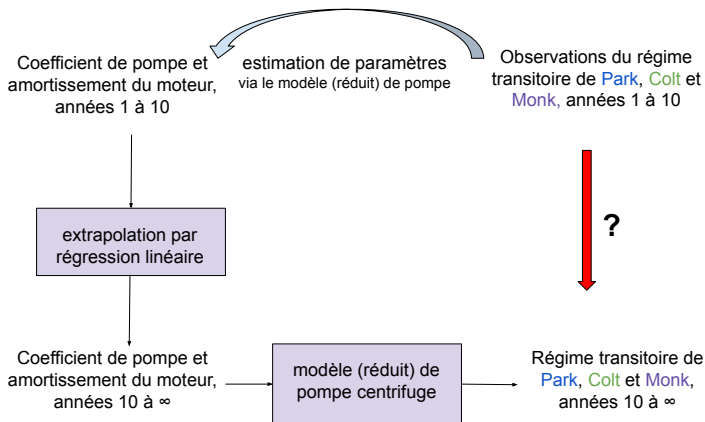
3. <https://github.com/openturns/otfmi>

Réduction du modèle

- L'émulateur reproduit bien les régimes transitoires.



Méthode de prévision de défaillance

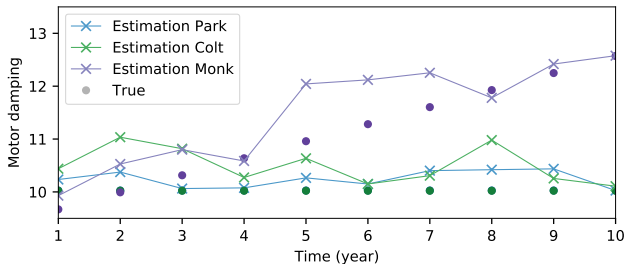
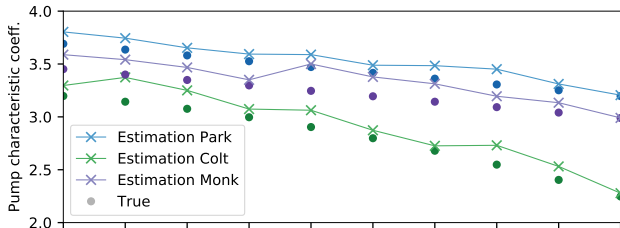


Estimation des paramètres de dégradation

- ▶ On veut estimer la valeur des paramètres pour chaque unité Park, Colt et Monk.
- ▶ On emploie l'inférence bayésienne, qui permet un compromis entre connaissance physique du système et observations.

Estimation des paramètres de dégradation

- ▶ Les tendances estimées sont correctes.

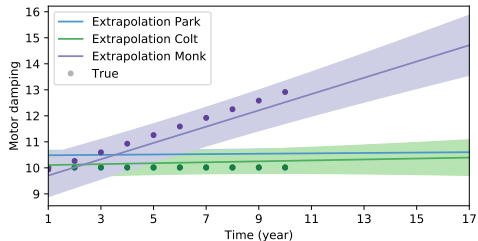
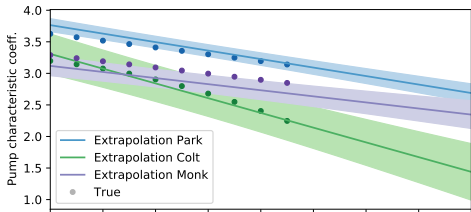


Prédiction de la défaillance

- ▶ On veut prédire l'instant auquel chaque unité franchira le seuil critique.
- ▶ Seuil critique : il faut que le débit massique nominal soit atteint en moins de 30 s.
- ▶ On prédit donc les valeurs des paramètres de chaque jumeau numérique et on vérifie si les transitoires obtenus sont conformes.

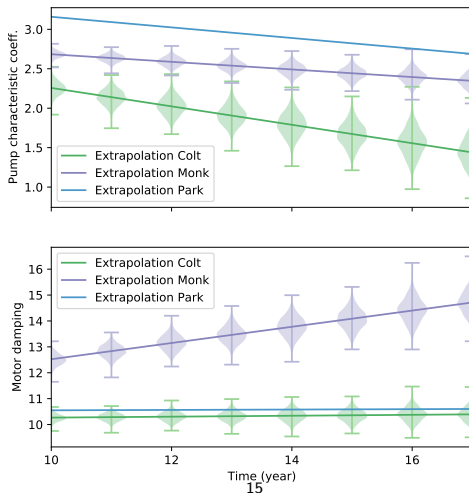
Prédiction de la défaillance

- ▶ On extrapole la tendance des paramètres par régression linéaire.



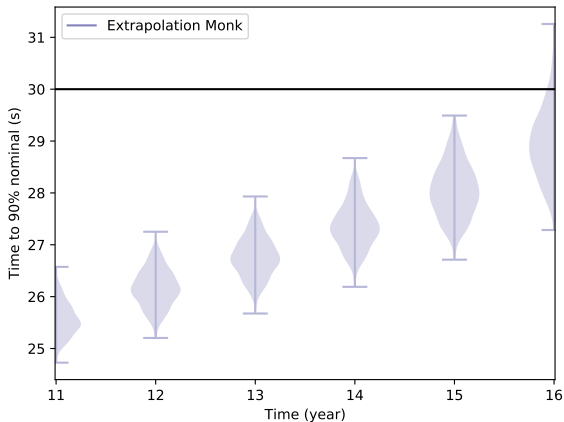
Prédiction de la défaillance

- ▶ On s'intéresse à la distribution de probabilité de chaque paramètre pour les unités **Colt** et **Monk**.



Prédiction de la défaillance

- ▶ Les unités **Colt** et **Park** dépasseront le seuil acceptable dans plus de 8 ans, l'unité **Monk** dans 6 ans.



Synthèse

- ▶ On a anticipé l'instant de défaillance des trois unités et identifié leur cause probable.
- ▶ Méthode : utilisation conjointe de jumeaux numériques et méthodes probabilistes / statistiques.
- ▶ Cette méthode est illustrée sur un exemple, basé sur un système réel.

**Merci pour votre
attention.**

