

Mécanique et incertain : méthodes et applications des analyses de sensibilité et fiabilité

Partie 2 : Applications

M. Lemaire (IFMA/Phimeca)

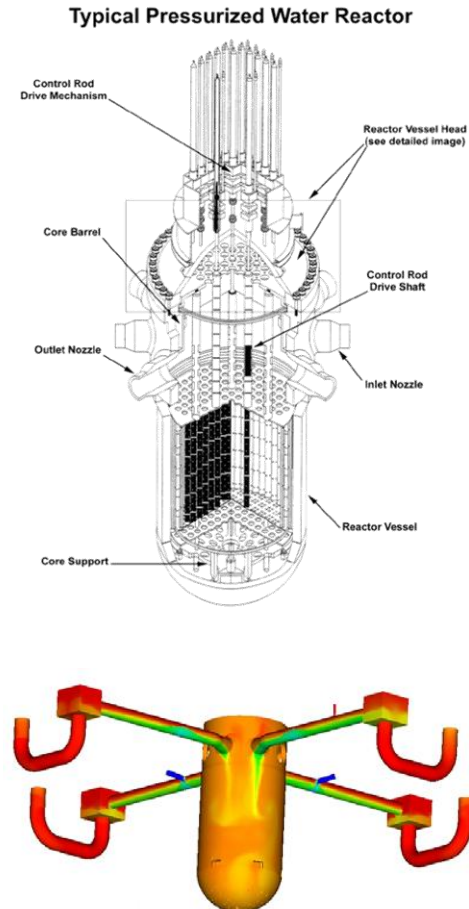
T. Yalamas (Phimeca)

Fiabilité en mécanique: quelques applications

- Fiabilité de la cuve de réacteur
- Durée de vie d'un collecteur d'échappements
- Usure d'un groupe motopompe
- Analyse de tolérancement
- Synthèse

Contexte

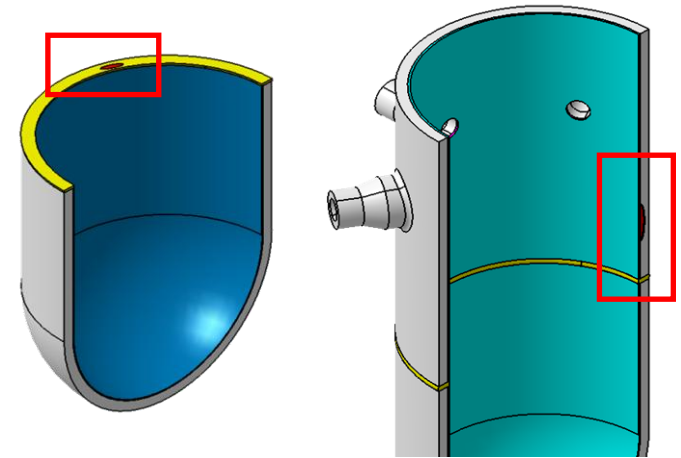
- Les cuves de réacteur des centrales nucléaires sont sollicitées en **pression et température** (en fonctionnement normal à 300°C, 155 bars).
- En cas d'arrêt incidentel, le réacteur est refroidi par une injection de sécurité d'eau froide : **choc thermique pressurisé** sur la paroi de la cuve.
- Un défaut qui se trouverait dans la paroi pourrait s'amorcer et conduire à la rupture brutale.



Fiabilité de la cuve de réacteur

Objectifs

- Justifier la tenue de la cuve en présence d'un défaut hypothétique sous revêtement (elliptique, circonférentiel ou longitudinal, de taille et position incertaines) dans le cadre de la mécanique de la rupture



$$P_f = P \left[\min_{t \in [0, T]} \left(K_{I_c}(\phi, T(t)) - K_I(\underline{\underline{\sigma}}(t)) \right) \leq 0 \right]$$

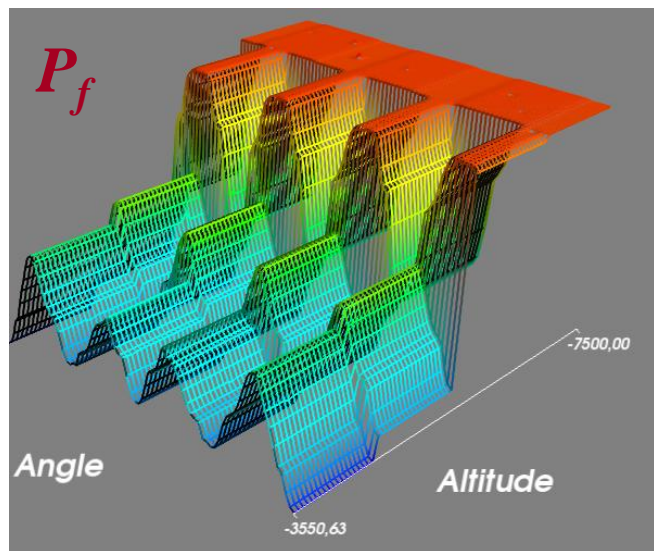
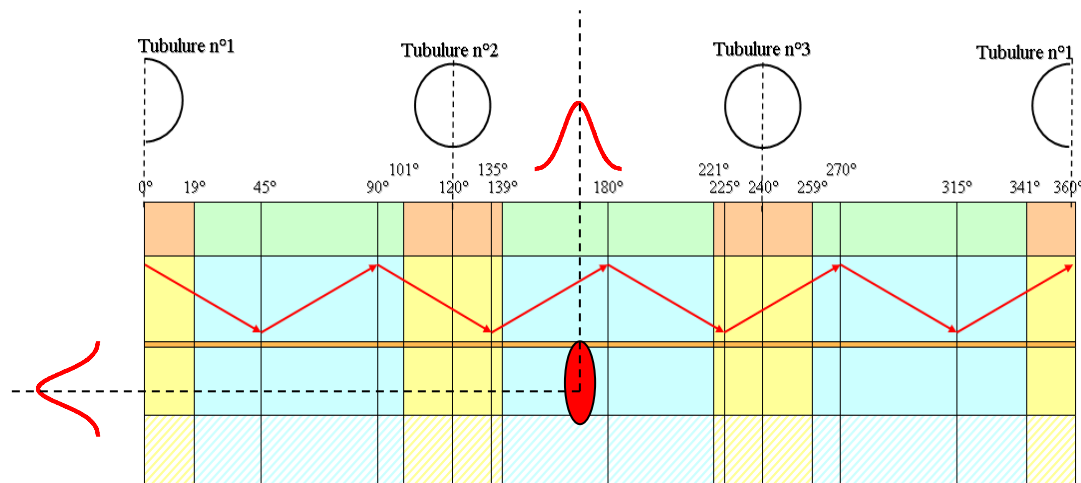
- Calculer l'indice de fiabilité associé, en tenant compte de la dispersion des propriétés à rupture (ténacité) et de l'effet de l'irradiation.

Méthodologie utilisée

- Méthode FORM / SORM
- Simulation (directionnelle et *subset simulation*)

Fiabilité de la cuve de réacteur

Résultats

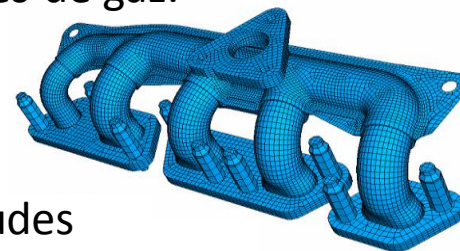


- Calcul de **cartes de probabilité de rupture** (conditionnellement à la position du défaut)
- Probabilité de rupture **globale**
- Détermination des paramètres importants (hiérarchisation)
- Évaluation des « marges probabilistes »

Durée de vie d'un collecteur d'échappement

Contexte

On s'intéresse à un collecteur d'échappement soumis à des sollicitations thermiques pouvant conduire à une fissuration et des fuites de gaz.



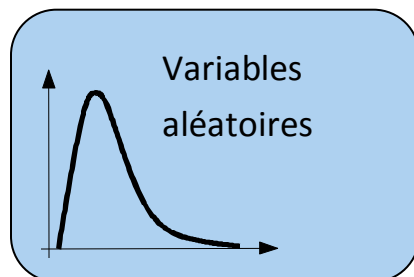
Objectifs de l'étude

- Estimer la **fiabilité** en prenant en compte les incertitudes
- Déterminer les **paramètres influents** sur lesquels jouer pour optimiser la conception

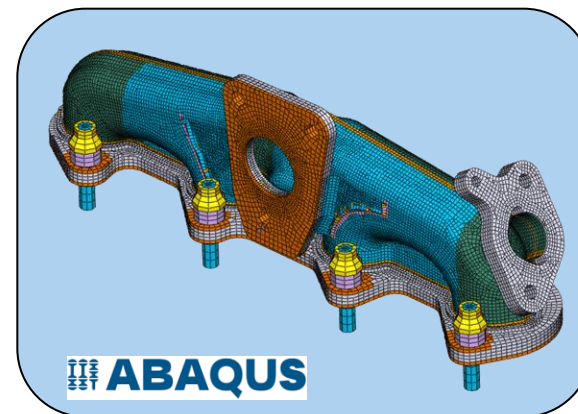
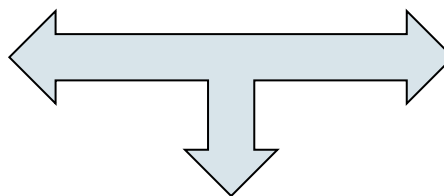


Durée de vie d'un collecteur d'échappement

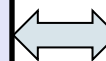
☐ Méthodologie



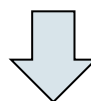
- Géométrie
- Chargement
- Propriétés matériaux



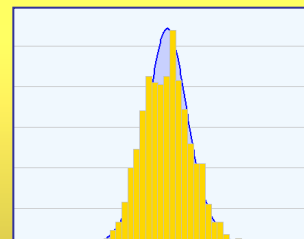
PHIMECA SOFT



Utilisation d'une surface de réponse pour limiter les temps de calcul (Plan d'expériences numériques)



Distribution de déformation plastique cumulée en chaque noeud



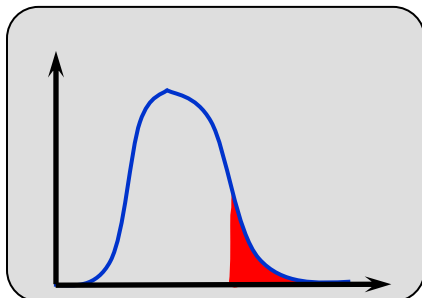
Durée de vie d'un collecteur d'échappement

Methodologie

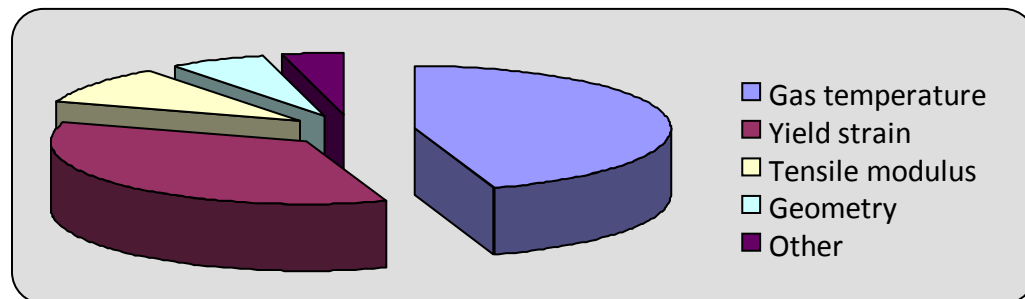
$$\ln N(S, \omega) = \lambda(S) + \sigma(S) \xi(\omega)$$

Résultats

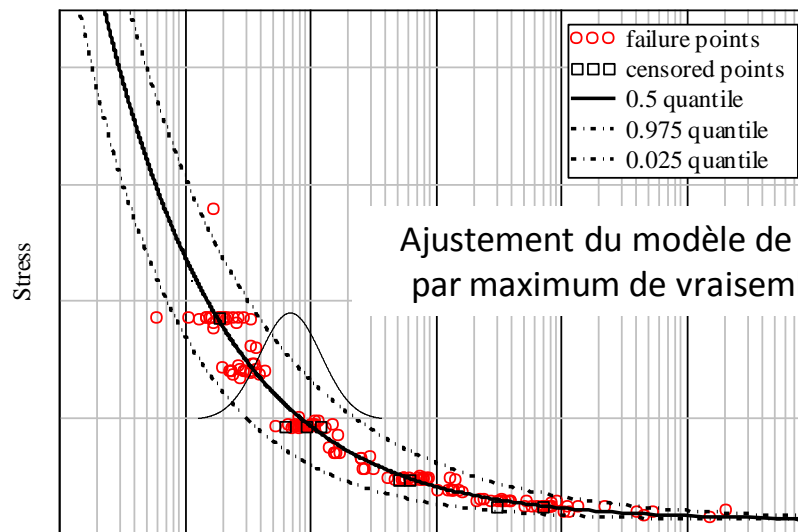
■ Probabilité de défaillance



■ Hiérarchisation de l'influence des variables



First model

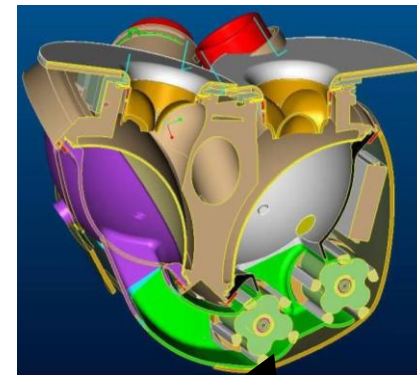


Thousands of cycles

Usure d'un groupe motopompe

☐ Groupe MotoPompe du cœur artificiel CARMAT

- **Fonction** : réguler le flux sanguin en fonction des exigences de l'organisme
- **Mode de défaillance** : usure
- **Objectif de fiabilité** : 90% de bon fonctionnement à 5 ans



☐ Objectifs de l'étude

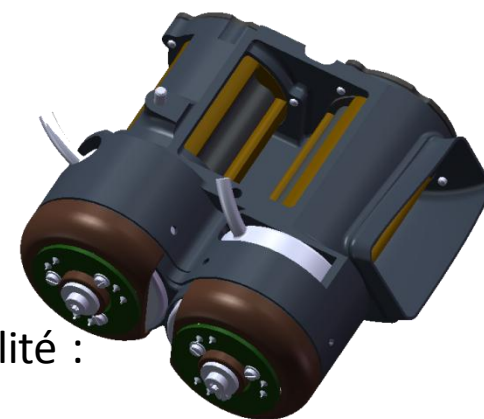
- **Démontrer l'atteinte de l'objectif de fiabilité**
- **Estimer le potentiel de fiabilité**

☐ Problématique

- Plan d'essais nécessaire pour démontrer l'objectif de fiabilité :
22 pièces pendant 5 ans !
→ Non compatible avec un planning industriel en termes de coûts / délais



Utilisation d'essais accélérés et de la simulation



Usure d'un groupe motopompe



Methodologie

Définition des conditions
d'utilisation

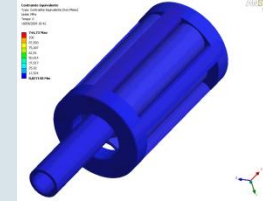
Détermination des
« profils de missions »

Définition d'essais accélérés
Estimation de la fiabilité

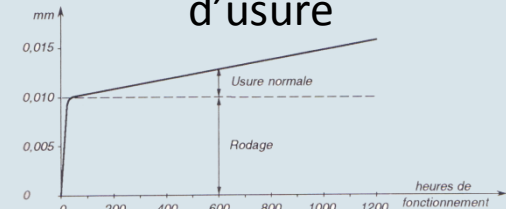
Prise en compte des dispersions

- Vitesse de glissement
- Dureté
- Pression

Modélisation du
comportement



Caractérisation des lois
d'usure



Essais « matériaux »,
tribologie

La méthode permet de :

- Connaître le potentiel de durée de vie de la pièce très en amont dans le projet
- Définir des essais accélérés compatibles avec les exigences d'un projet

Enjeux

- Evaluer, à priori, le taux de non-assemblage d'un système compte tenu :
 - De la cotation fonctionnelle des pièces;
 - Des process de fabrication envisagés.

⇒ Optimiser la conception (e.g. en évitant les surcoûts liés à des exigences plus fortes que nécessaire)
- Identifier les cotes critiques
- En cas de crise (fabrication non conforme), améliorer la prise de décision

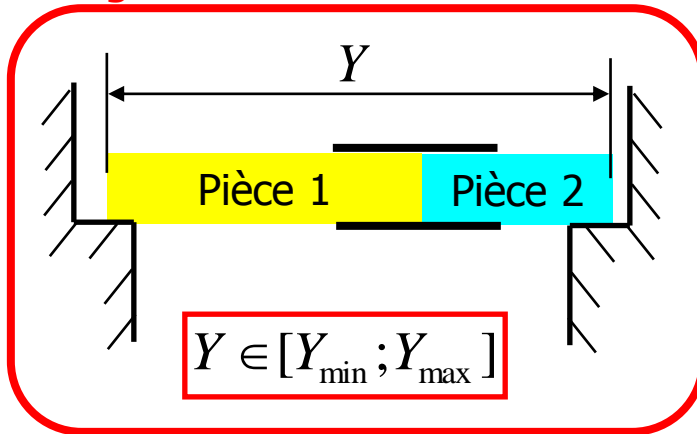
⇒ Optimiser le suivi de la fabrication

Analyse du tolérancement

☐ Principe

LE PRODUIT DOIT FONCTIONNER SANS PROBLEME QUALITE

Exigence fonctionnelle



Exigence qualité

$$\text{Prob}(Y \notin [Y_{\min}; Y_{\max}]) \leq 10\text{ppm}$$

↳ Taux de non conformité

Exigences sur chaque pièce

Pièce 1

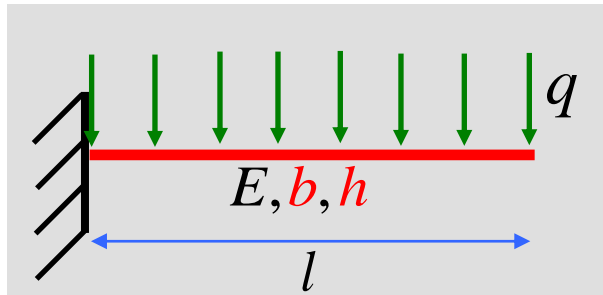
Pièce 2

?

Taux de non-conformité \Leftrightarrow Niveau de risque de non assemblage

Principe

Fiabilité des structures : méthodes et outils éprouvés



Fonction de performance

$$G = f_{adm} - f(q, E, b, h, l)$$

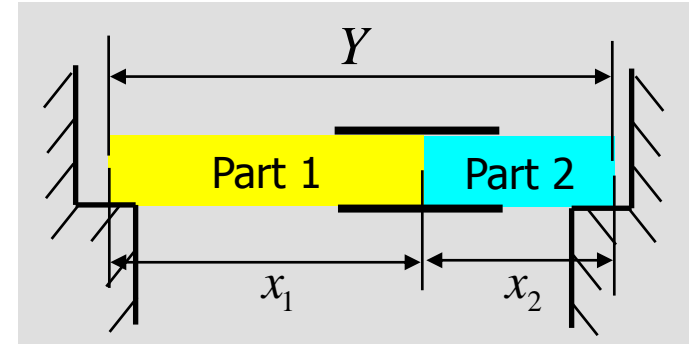
Variables de distribution connue

Probabilité de défaillance :

$$P_f = \text{Prob}(f_{\max} - f(q, E, b, h, l) \leq 0)$$

Fiabilité système

Optimisation mécano-fiabiliste



Chaîne de cotes

$$Y(x_1, x_2) = x_1 + x_2$$

Cotes, exigences de capacités connues

Taux de Non conformité

$$\text{TNC} = \text{Prob}(Y \notin [Y_{\min}; Y_{\max}])$$

Taux de Non Conformité de la fonction

Cotation probabiliste

Analyse du tolérancement

Concrètement

Des développements méthodologiques

- Thèse IFMA/Phimeca + Radiall, Valeo
- Projet ANR AHTOLA (ENSAM Metz, IFMA, Phimeca, Radiall, Valeo, Pirburg)

Un outil disponible : PhimecaTolerancing (v0)

Des études démonstratives

En guise de conclusion

Des contextes différents

- Cuve de réacteur nucléaire : petite série (voir unité), défaillance non constatée (heureusement !).
- Collecteur d'échappement : (très) grande série, défaillance constatée.

Des regards/point de vue différents... et complémentaires !

- Fiabilité prévisionnelle (AMDEC, APR, Approches mécano-probabilistes)
- Fiabilité expérimentale
- Fiabilité en exploitation

Une même question: la fiabilité des composants mécanique