Approche probabiliste pour l'optimisation de la maintenance de composants en acier des centrales nucléaires REP

Emmanuel ARDILLON
EDF-R&D/PRISME
Xiaofan YANG
EDF/UNIE/GMAP

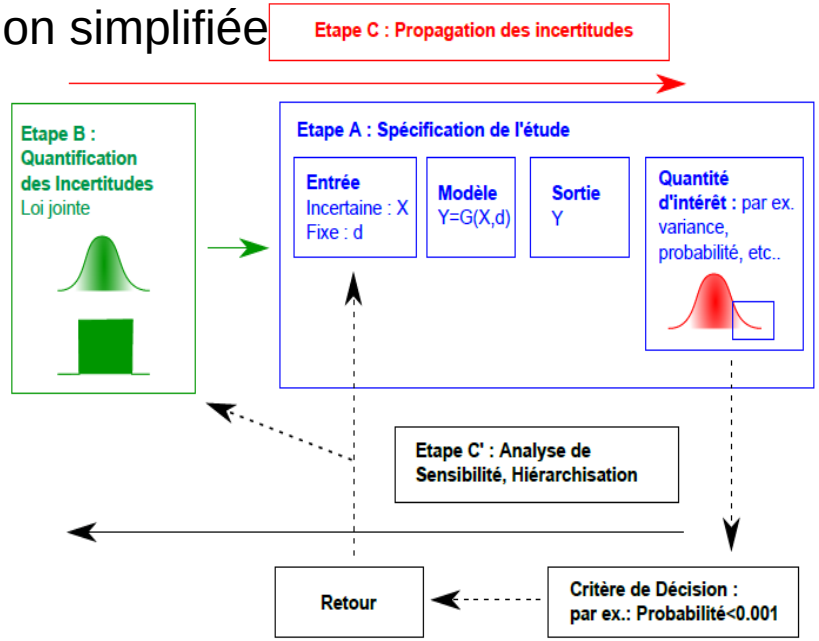
IMdR
Institut pour la Maîtrise des Risques
Sûreté de Fonctionnement - Management - Cindyniques

Problématique

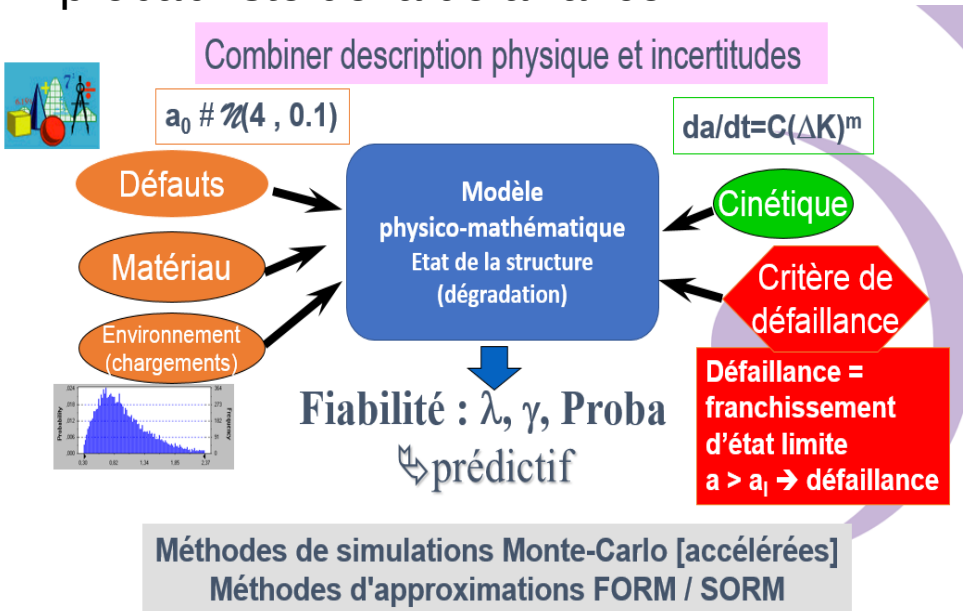
- Fond d'un composant en acier de centrale nucléaire REP soumis à corrosion atmosphérique en milieu confiné sur sa surface externe
- Risque de sous-épaisseur (l'épaisseur doit rester > 2 mm)
- Sélection de 23 points de mesure dans la zone la plus corrodée, suivis au cours du temps (plusieurs campagnes de mesure)
- Maintenance envisagée:
  - Réparation d'un ensemble de points de mesure à déterminer
  - Ou remplacement du fond du composant
- L'approche probabiliste (fiabilité des structures) répond à ce questionnement
  - Calcul d'un risque global de sous-épaisseur au cours du temps

Méthodologie générale

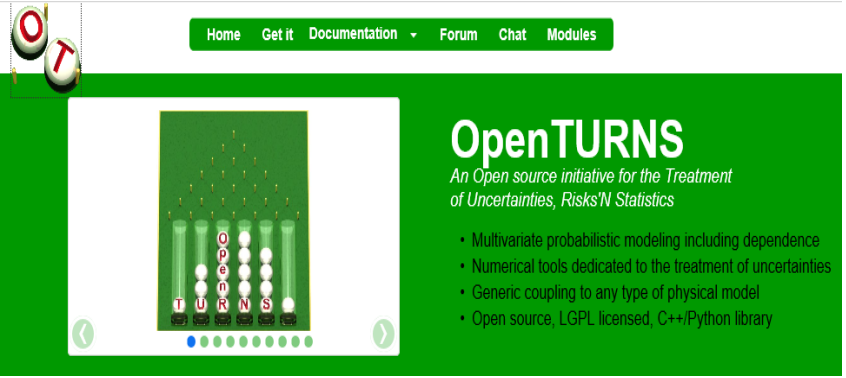
Référentiel « Incertitudes » – version simplifiée

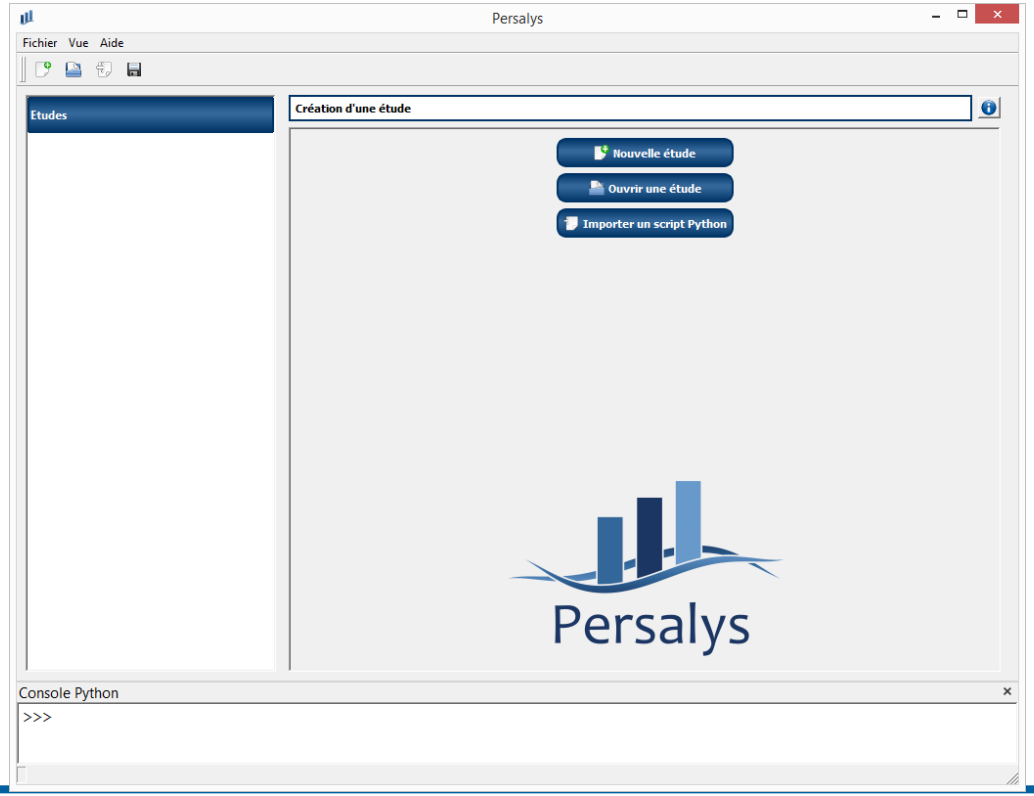


Fiabilité des Structures = Approche probabiliste de la défaillance



Outils utilisés





Etape A – Modèle physico-mathématique

- Significativité de la corrosion

TEST DE WILCOXON POUR LES DIFFÉRENTES CAMPAGNES

Campagnes comparées	Statistique	p-valeur
2001 - 2016	0	0.002
2010 - 2012	17	0.002
2010 - 2016	14.5	0
2012 - 2016	26	0.03

- Corrosion atmosphérique en milieu confiné: pas de modèle physique pertinent pour le taux de corrosion

La base: $Ep_{mes}(t) = Ep_{réelle}(t) + \varepsilon$

$$Ep_{mes,k}(t_i) = Ep_{mes,k}(t_0) - \varepsilon_0 + c_{0i,\,réel} \cdot (t_i - t_0) + \varepsilon_i$$

$$c_{ij,\,mes} = c_{ij,\,réel} + (\varepsilon_j - \varepsilon_i) / (t_j - t_i) \quad / \; \varepsilon_j - \varepsilon_i = \varepsilon' \text{ d'écart-type } \sigma_\varepsilon . \sqrt{2}$$

$$\mu_{ij,\,mes} = \mu_{ij,\,réel}$$

$$\sigma^2_{ij,\,mes} = \sigma^2_{ij,\,réel} + (2.\sigma^2_\varepsilon) / (t_j - t_i)^2$$

Estimé A connaître

Etape B – Modèle probabiliste

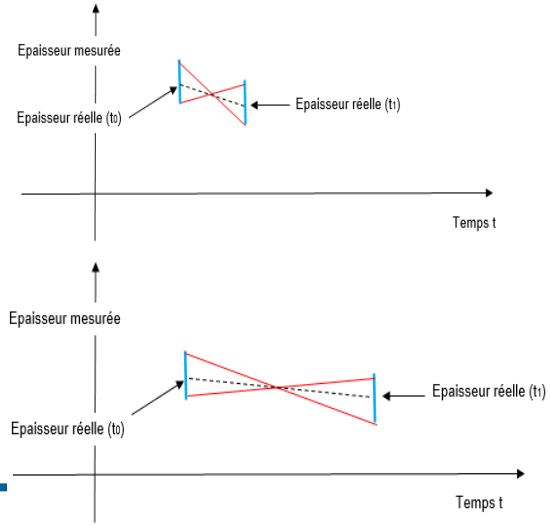
2 variables aléatoires d'entrée (pour le problème individuel)

Erreur globale de mesure ε

Hypothèse classique de normalité + Avis d'expert et vérification sur les données : σ_ε = 0,2 ou 0,3

Cinétique réelle

1ère étape: choix des campagnes de mesure: les plus éloignées dans le temps: 2001 - 2016



Etape B – Modèle probabiliste

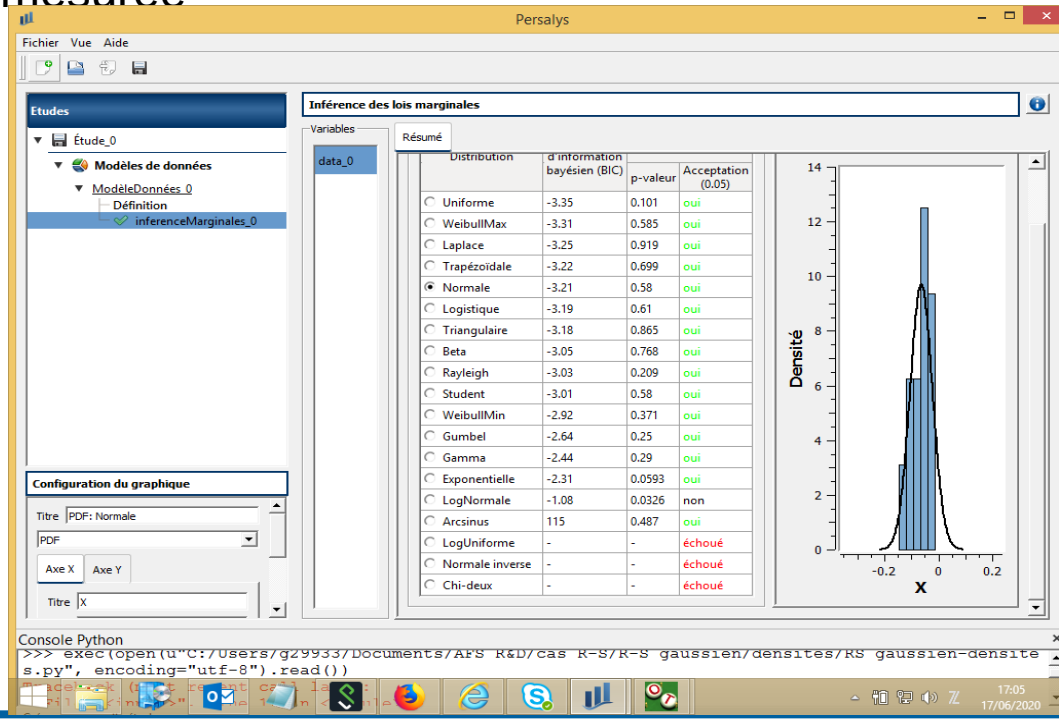
2ème étape: ajustement de la cinétique mesurée

Shapiro-Wilk: normalité acceptable (p-valeur = 0,27)

Classement global des distributions Persalys V8, 2020

BIC et KS ne conduisent pas au même Classement

Plusieurs critères pris en compte



Etape B – Modèle probabiliste

Analyses des ajustements (cin_{mes}) – campagnes 2001 - 2016

- Normalité: Aucune alternative vraiment meilleure

Distribution	BIC	KS	Q-Q plot	Non tronquée	Autre
Uniforme	+	--	--	-	- (moments non OK)
WeibullMax	+	=	+	-(1 seule borne)	
Laplace	+	++	-	=	
Trapézoidale	+	+	-	-	
Logistique	-	+	+	=	
Triangulaire	-	++	-	-	
Beta	-	+	=	-	
Student	-	=	= (bizarre : identique à Normale)	=	Ectp non OK

Etape B – Modèle probabiliste

Au final:

ε Normale + cin_{mes} Normale ⇨ $cin_{réelle}$ Normale

Paramètres déduits des équations

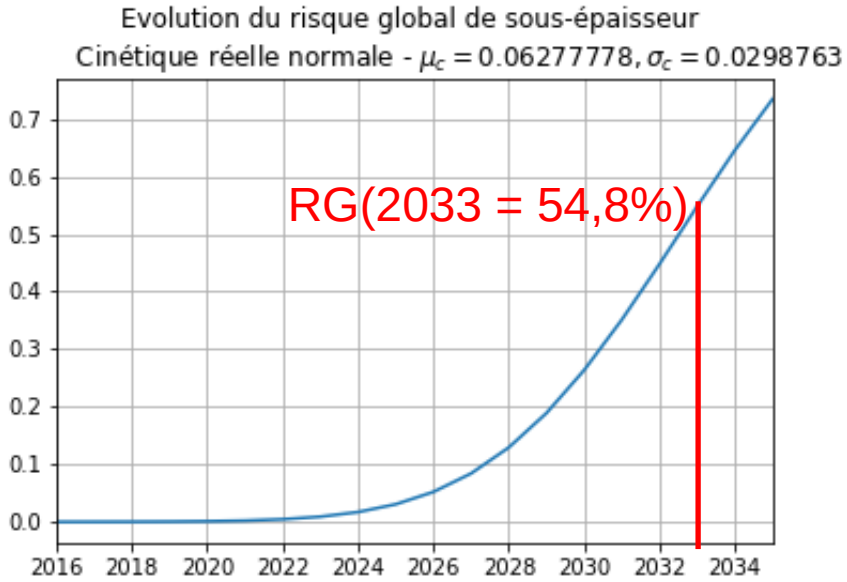
$$\mu_{ij,\ mes} = \mu_{ij,\ réel}$$

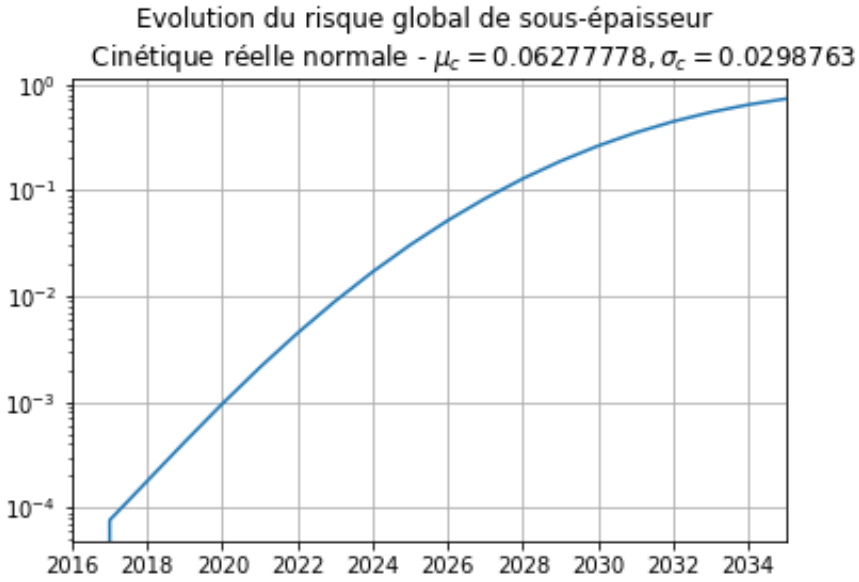
$$\sigma^2_{ij,\ mes} = \sigma^2_{ij,\ réel} + (2.\sigma^2_{\varepsilon}) / (t_j - t_i)^2$$

Etape C – calcul du risque global de sous-épaisseur au cours du temps

Cumul des risques « individuels » de sous-épaisseur, indépendants

$$RG(t_i) = 1 - \prod_{k=1}^{n}(1 - P_{def}(t_i, k))$$





Utilisation des résultats probabilistes

Pour limiter le risque global de sous-épaisseur en 2033 à 10%, il suffit de réparer 8 points sur les 23 points de mesure (les plus risqués)

Pour limiter le risque global de sous-épaisseur en 2033 à 5%, il suffit de réparer 11 points (et alors RG(2033) = 4,04%)

Le remplacement du fond du composant n’est pas nécessaire

Conclusions

Intérêt industriel

- Approche probabiliste: traitement rigoureux des incertitudes, évaluation d'un risque

- La Fiabilité des Structures permet d'optimiser la maintenance d'un composant
  - Remplacer le fond n'est pas nécessaire
  - Selon le niveau de risque accepté, une liste de zones à réparer
    - 10% en 2033: 8 points – 5%: 11 points

- Etude de sensibilité envisagée (paramètres des distributions)

Conclusions

Intérêt scientifique

- Le cas élémentaire de la Fiabilité des Structures (i.e. la méthode contrainte-résistance) trouve une application industrielle concrète

- Modèle physique: non donné, élaboré à partir de données

- Intérêt des événements système dans les approches fiabilistes
  - Pertinence du chantier récent dans OpenTURNS à ce sujet
  - Développer des indices de sensibilité adéquats?

- Réflexions autour des tests statistiques dans OpenTURNS/Persalys